РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
•••
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО
ОСВОЕНИЯ НЕДР (ИПКОН РАН)

В.Н. Одинцев

ОТРЫВНОЕ РАЗРУШЕНИЕ МАССИВА СКАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Москва 1996

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО
ОСВОЕНИЯ НЕДР (ИПКОН РАН)

В.Н. Одинцев

ОТРЫВНОЕ РАЗРУШЕНИЕ МАССИВА СКАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Ответственный редактор
профессор, доктор технических наук С.Д.Викторов

Москва 1996

УДК 622.83 + 539.4

Одинцев В.Н. Отрывное разрушение массива скальных горных пород – М.: ИПКОН РАН, 1996, 166 с. ISBN 5-201-15560-X

Монография посвящена теоретическим и прикладным вопросам разрушения горных пород при сжатии. Разрушение пород рассматривается по схеме: анализ разрушения образцов пород; описание результатов наблюдений отрывного разрушения пород в горных выработках; разработка математических моделей развития трещин отрыва; моделирование отрывного разрушения; обобщение результатов моделирования в отношении прогноза разрушения пород в выработках.

Главное внимание уделено вопросам развития трещин отрыва в скальных породах в масштабе выработок. Рассматривается участие в отрыве таких факторов (природных и искусственных), как газ и вода.

Для научных работников, специализирующихся в области разрушения горных пород и проблем горного давления. Может быть полезна аспирантам и студентам горных вузов, знакомящимся с проблемами геомеханики.

Ил. – 46, список лит. – 184.

Отв. редактор проф., докт. техн. наук С.Д.Викторов

ISBN 5-201-15560-X

© В.Н.Одинцев
© ИПКОН РАН

ПРЕДИСЛОВИЕ

Монография содержит результаты изучения весьма необычного вида разрушения массива горных пород в подземных выработках – отрывного разрушения при сжатии. Необычность этого вида разрушения выражается в том, что отрыв (разрушение при растяжении) происходит при действии не растягивающих, а сжимающих напряжений.

Парадоксальность отрыва при сжатии была причиной того, что этот вид разрушения пород как в масштабе образца, так и в масштабе выработки долгое время оставался не изученным. Более того, возможность такого разрушения пород в выработках некоторыми исследователями отрицалась.

Развитие практики подземных работ на больших глубинах и результаты некоторых натурных экспериментов, прежде всего в США, России и ЮАР, изменили положение. Было установлено, что на больших глубинах в прочных, слаботрещиноватых массивах отрыв – едва ли не главный тип разрушения пород на обнажениях. Явления отрывного разрушения пород в одних условиях могут осложнять геотехническую деятельность, в других – быть благоприятным фактором. Понимание и прогнозирование отрыва пород не являются уже чисто теоретической проблемой. Эта проблема имеет большое практическое значение при создании эффективной и безопасной технологии освоения больших глубин, бурении и поддержании устойчивости глубоких скважин. Осознание этого значения придало новый импульс исследованиям по тематике отрыва пород, в результате чего появилось множество работ в этой области.

Главное отличие предлагаемой работы от известных публикаций по отрывному разрушению сжатых пород состоит в том, что эта работа является первой монографией, в которой разрушение рассматривается всесторонне, а именно по схеме: анализ разрушения образцов пород; описание наблюдений отрывного разрушения пород в горных выработках; разработка математических моделей; моделирование; обобщение результатов моделирования в отношении прогноза разрушения пород в выработках.

Другое отличие связано с тем, что в настоящей работе исследуются вопросы развития трещин отрыва в масштабе выработки, в то время как во многих фундаментальных работах, посвященных отрыву пород при сжатии, рассматривается обычно микромеханика отрывного разрушения (развитие микротрещин от микродефектов). Кроме того, здесь рассматривается участие в отрыве таких факторов (природных или искусственных), как газ и вода.

Настоящая монография рассчитана на специалистов, занимающихся вопросами хрупкого разрушения пород в связи с проблемами горного дела, добычи нефти, подземного строительства, сейсмологии, захоронения ядерных отходов. К сожалению, жесткие ограничения на объем книги не позволили представить здесь результаты прикладных исследований более широко. Тем не менее надеюсь, что эта книга расширит кругозор читателя как в отношении теории, так и в практики разрушения сжатых горных пород и поможет в решении стоящих перед ним задач.

Список литературы, представленной в монографии, не претендует на исчерпывающую полноту, особенно в отношении зарубежных публикаций. Однако в тех работах, которые упомянуты, заинтересованный читатель может найти ссылки на многие другие работы по рассматриваемому вопросу.

Большую помощь автору при проведении исследований, описанных в этой книге, оказали Л.В.Никитин и В.А.Трофимов. Некоторые важные результаты были получены при их непосредственном участии. Автор выражает им свою глубокую признательность и благодарность.

Автор благодарен В.А.Бобину, Ю.П.Галченко, А.Н.Галыбину, Н.Ф.Замесову, Б.М.Зимакову, В.И.Кареву, Ю.Ф.Коваленко, В.И.Кондаурову, С.В.Кузнецову, И.В.Милетенко, Ш.А.Мухамедиеву, Е.И.Рыжаку, М.Э.Слониму за сотрудничество и плодотворные дискуссии, а также Н.А.Малышевой и А.Г.Красавину за помощь в подготовке рукописи к печати.

Исследования, приведенные в главах 2 и 6, осуществлены при финансовой поддержке РФФИ (гранты 96-05-65884, 94-05-17553).

В.Н.Одинцев

ВВЕДЕНИЕ

Добыча твердых полезных ископаемых в настоящее время и особенно в перспективе в значительной степени связана с разработкой месторождений на больших глубинах. На крупных рудниках Норильского региона, Горной Шории, Кольского полуострова добыча полезных ископаемых ведется с глубин более 800 м, на шахтах Донбасса с глубины более 1200 м, в Южной Африке и Индии глубина разработки месторождений превысила 3500 м.

Разработка месторождений на больших глубинах вызывает определенные технологические и технико-экономические трудности при их вскрытии, подъеме добываемой горной массы, проветривании выработок, использовании горного оборудования и др. [20].

Особую актуальность приобретают проблемы обеспечения безопасности горных работ. С глубиной увеличиваются природные напряжения в нетронутом массиве горных пород, поэтому напряжения, действующие в элементах горных геоконструкций, становятся соизмеримыми с прочностью пород. Это является причиной увеличения частоты и масштаба опасных проявлений горного давления, в частности его динамических форм: горных ударов, выбросов пород и газа, внезапных обрушений, стреляний пород [13, 20, 171]. Подобная ситуация складывается при разработке месторождений в регионах, где действуют высокие тектонические напряжения [2,68].

Проблемы эффективности, безопасности, экологии горного производства на больших глубинах необходимо решать в рамках общего научного подхода к освоению природных богатств [117]. Среди горных наук, составляющих базу такого подхода, важное место занимает горная геомеханика [20,21,71,146]. Изучение геомеханических процессов, происходящих в массиве горных пород при разработке ископаемых, должно способствовать созданию новых схем добычи, разработке аналитических и инструментальных методов контроля и прогноза геомеханических явлений. Но главное, с помощью теории и практики горной геомеханики может быть разработана технология управления геомеханическими процессами в соответствии с общей концепцией освоения недр.

Геомеханические исследования имеют большое значение и для других областей геотехнической деятельности, например, для создания долговременных подземных сооружений и хранилищ [129], бурения глубоких скважин [75,118], захоронения ядерных и токсичных отходов [72], сохранения среды обитания [105], предотвращения природных катастроф [127], а также при разработке геотермальных месторождений [39].

Для решения проблем устойчивости горных выработок и скважин первостепенное значение имеют процессы деформирования и разрушения горных пород. Под разрушением некоторой области массива горных пород здесь понимается необратимый качественный переход этой области в новое механическое состояние. В этом переходе, сопровождаемом изменением структуры массива (развитием трещин или других повреждений), качественно изменяется способность рассматриваемой области массива противостоять горному давлению или технологической нагрузке.

Наряду с возможностью отделения разрушенной области от массива (как происходит при обрушениях), в условиях всестороннего сжатия возможно сохранение кажущейся сплошности массива и тем самым сохранение способности разрушенной области деформироваться под нагрузкой. Однако в отличие от состояния пластичности массив при разрушении не сохраняет исходные механические свойства при разгрузке и повторном нагружении.

Деформирование сильнотрещиноватого массива пород вблизи выработок проявляется, главным образом, в развитии сдвижений пород по природным трещинам. Эти сдвижения заметны даже на глаз. Из-за смещения структурных блоков породы разрушается крепь, изменяется сечение выработок, нарушаются транспортные пути и т.п. Часто это ощущение "давления" горных пород становится пугающим.

В слаботрещиноватых, прочных массивах наиболее опасны динамические проявления горного давления. Они обусловлены хрупким разрушением массива и развитием в нем новых (наведенных) трещин. Динамические явления происходят, как правило, внезапно. Именно внезапность часто является причиной тяжелых последствий. Кроме того, угроза динамических проявлений горного давления в забоях глубоких рудников требует постоянного внимания к состоянию массива пород, что создает атмосферу психологического напряжения у рабочих и отрицательно влияет на производительность труда.

Если вопросам перераспределения природных напряжений и сдвижения пород посвящено много теоретических и экспериментальных исследований (ссылки, например, можно найти в [7,13,19,22,49,62,73,142,171]), то разрушение массива с образованием наведенных трещин (хрупкое разрушение) изучено явно недостаточно для решения многих теоретических и практических задач.

Некоторые интригующие натурные данные в отношении хрупкого разрушения известны уже более пятнадцати лет (например зональная дезинтеграция пород). Однако теоретические разработки, способствующие пониманию механизма разрушения, еще не вышли из стадии поисковых работ и не формируют общую

картину процесса разрушения массива, хотя бы даже в концептуальной форме, поэтому исследования в этой области горной геомеханики по-прежнему очень актуальны и отвечают задачам фундаментальных исследований.

Общая картина трещинообразования в массиве горных пород весьма разнообразна как по типу образующихся трещин, так и по их количеству и масштабу. Вблизи глубоких выработок можно выделить два типа хрупкого разрушения пород – отрыв и поперечный сдвиг. На рисунке 1 представлена типичная картина трещинообразования в массиве горных пород впереди забоя глубокой очистной выработки, характерной для глубоких золотодобывающих рудников. Подобные зарисовки часто встречаются в работах южно-африканских специалистов по проблемам горного давления.

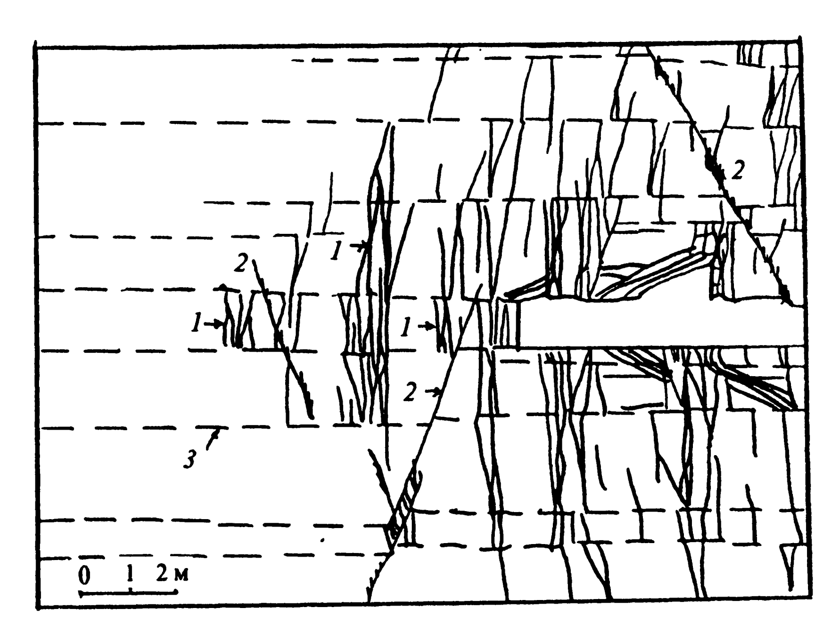


Рис. 1. Наведенная трещиноватость массива горных пород вблизи забоя глубокой выработки [146]

Трещины отрыва (на рисунке отмечены цифрой *1*) образовались в зоне опорного давления, где в массиве действуют только сжимающие напряжения. Поверхности трещин отрыва ориентированы согласно поверхности забоя. Зоны интенсивного отрывного

трещинообразования сменяются областями почти ненарушенных пород.

Протяженные сдвиговые трещины *2* образовались под углом к плоскости простирания залежи. Наведенные сдвиговые и отрывные трещины пересекают природные естественные трещины *3* в массиве, ориентированные вдоль простирания залежи. Рост наведенных трещин, взаимодействие их между собой и с природными трещинами определяют конкретные проявления горного давления в очистных выработках: стреляние пород с поверхности забоя, толчки (подвижки) по трещинам сдвига, обрушения пород из кровли.

Изучение механизма образования подобных структур наведенной трещиноватости имеет большое научное значение. Как заметил Ch. Fairhurst [146], понимание причин образования пространственной периодичности трещиноватости поможет в решении проблемы образования геологических структур, развитии механики землетрясений, решении прикладных горных задач. В частности, результаты анализа условий динамического развития сдвиговых трещин, их распределения в пространстве должны лечь в основу микросейсмического контроля состояния массива при прогнозировании крупных горных ударов. Оценка мощности зоны трещин отрыва может быть полезной при расчете параметров крепления обнажений пород.

В методическом плане вопросы исследования сдвиговых наведенных трещин, вообще говоря, не вызывают принципиальных трудностей. Прогноз развития этих трещин может быть осуществлен аналитически, как например в [25,26,149] или численно [11,73,167] с помощью известных в механике методов. Малое число публикаций по этому вопросу объясняется лишь математической сложностью геомеханического анализа и необходимостью проведения тонких численных расчетов.

Напротив, вопросы описания и прогноза отрывного разрушения в массиве пород во многих случаях являются неординарными и методически сложными. Отрыв в массиве горных пород может происходить в результате действия растягивающих напряжений (тривиальный отрыв), а также при действии сжимающих напряжений (отрыв при сжатии).

Тривиальный отрыв пород (как и всякие тривиальные случаи) изучать несложно и прогнозировать сравнительно легко. Наиболее строго такой прогноз можно осуществить в результате расчета перераспределений напряжений в массиве горных пород методом последовательных циклов [73].

Отрыв пород, происходящий в условиях сжатия, является парадоксальным и вызывает у ряда исследователей недоумение. Согласно обычным представлениям о прочности твердого тела, отрыв

не должен происходить, если отсутствуют растягивающие напряжения. Там, где растягивающих макронапряжений в массиве нет, объяснить появление макротрещин отрыва очень трудно.

По этой причине не разработана математическая теория отрыва пород при сжатии, в рамках которой можно количественно описать закономерности трещинообразования пород вблизи выработок, установить связь между параметрами зон разрушения и напряжениями в массиве. Неразработанность теории сдерживает изучение механизма динамических проявлений горного давления (таких например, как стреляние и шелушение пород, внезапные выбросы), совершенствование методики расчета крепи горных выработок и устойчивости скважин на больших глубинах.

Настоящая работа является одной из немногих, которая посвящается теоретическим вопросам развития отрывного разрушения пород в масштабе выработок при действии в массиве сжимающих напряжений. Главная цель работы состоит в разработке математических моделей разрушения, с помощью которых можно провести качественные и количественные оценки развития отрыва в массиве горных пород, объяснить некоторые наблюдаемые в выработках проявления горного давления и разработать научные основы для управления процессом отрывного разрушения.

Для реализации этой цели, вообще говоря, можно воспользоваться двумя способами [56,77]. Первый способ целесообразен в том случае, когда размеры деформируемого тела (представительного объема массива горных пород) намного превосходят размеры микроразрушений (в частности микротрещин). В этом случае тело можно условно разбить на элементарные макрообъемы, включающие в себя представительные ансамбли микроразрушений. Объем, содержащий внутри себя микроразрушения, можно считать сплошным, а для определения состояния тела можно воспользоваться соответствующими феноменологическими соотношениями между напряжениями и деформациями. В эти соотношения следует ввести поправки, диктуемые представлениями об элементарных механизмах внутренних микроразрушений.

Второй способ описания разрушения относится к случаю, когда микроразрушения (в хрупком теле – микротрещины) могут вырасти настолько, что станут соизмеримыми с размерами тела. Обычно анализ разрушения в этом случае заключается в том, чтобы найти критериальное условие проявления микротрещины, оценить устойчивость ее развития и рассчитать развитие трещины до такой величины, которая сопоставима с размерами тела. Именно второй способ описания разрушения использован в настоящей работе.

Однако надо отметить, что на этом пути реализована главная часть, но не полная программа возможных исследований. В идеале следовало бы решить проблему коллективного взаимодействия трещин, причем с учетом фактора времени. В настоящей работе это не сделано, поскольку такие операции намного усложнили бы математическое исследование.

Учет коллективного взаимодействия возможно и выявил бы новые качественные эффекты в разрушении. Однако главные результаты, полученные в книге, – закономерности перехода разрушения с уровня микродефектов на уровень образцов пород и далее на уровень горной выработки в качественном и количественном отношении должны быть достоверными.

Теория развития отрыва при сжатии основывается на механике трещин Гриффитса-Ирвина [124]. Это объясняется несколькими причинами.

Во-первых, такой теоретический подход позволяет учесть достаточно много данных натурных наблюдений хрупкого разрушения массива, которые при других подходах, например с позиции деформаций растяжения [176] или потери устойчивости в структуре материала [36], остаются невостребованными. Это относится к траекториям развития наведенных трещин, их протяженности, расположенности друг относительно друга, состоянию берегов и т.д.

Во-вторых, значения основной характеристики прочности, используемой в теории трещин, – трещиностойкости – уже определены для многих горных пород, поэтому возможна количественная оценка разрушения.

В-третьих, в рамках механики трещин легко устанавливается устойчивость или неустойчивость развития трещины, что позволяет судить о возможности динамического проявления горного давления.

В-четвертых, при таком подходе можно использовать богатый методический материал и математический аппарат теории трещин, которая в связи с потребностью повышения прочности легких металлических конструкций в авиа- и ракетостроении в последние десятилетия развивалась особенно интенсивно.

Список основных обозначений

$2b$ - длина участка соприкасания берегов в макротрещине
c - значение координаты точки приложения фиктивной распирающей силы
D - минимальное расстояние от прямолинейной макротрещины до свободной поверхности
d - характерный размер микродефекта (длина, диаметр)
d_0 - диаметр поры
d_* - эффективный размер трещинопорождающего дефекта
E - модуль Юнга
H - глубина разработки
h_* - критическое расхождение берегов в макротрещине
K_1 - коэффициент интенсивности нормальных напряжений
K_2 - коэффициент интенсивности касательных напряжений
K_{1c} - трещиностойкость (вязкость разрушения)
$2L$ - длина разреза
$2L_B$ - длина выработки
$2l$ - длина макротрещины
$2l_0$ - начальная длина макротрещины
$2l^*$ - критическая длина открытой макротрещины
$2l_*$ - критическая длина закрытой макротрещины
$2l_k$ - критическая длина трещины в газоносной породе
M - условный модуль запредельного деформирования
m_0 - мощность пласта
N - горное давление от веса налегающих пород
N_* - критическое значение горного давления
P - сосредоточенная нагрузка в макротрещине
p - давление газа (воды)
p_k - давление воды в скважине (камере)
p_k^* - давление воды в камере после сброса давления
$p_{кр}$ - начальное давление гидроразрыва
p_0 - природное давление порового заполнителя
$p_C(r)$ - распределение давления воды в порах
Q - сосредоточенная нагрузка в микротрещине
q - распирающая нагрузка в трещине
R - длина краевой части пласта

R_* - критическая длина краевой части пласта
R_*^0 - длина отслоившейся краевой части пласта
r, θ, z - полярные координаты
r_k - начальный радиус скважины (добычной камеры)
r_* - радиус скважины после цикла разрушения
$2S$ - длина микротрещины
$2S_i$ - длина начальной микротрещины
$2S_0$ - расстояние между дефектами
T_N - нормальная нагрузка на краевую часть
t - координата в криволинейной трещине
V - объем
x, y - координаты прямоугольной системы координат
γ - энергия единицы свободной поверхности, средний удельный вес налегающих пород
γ_1, γ_3 - постоянные микротрещинной модели
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ - главные компоненты деформаций
ζ - безразмерный параметр нагрузки
ζ_* - критическое значение обобщенной нагрузки
η - эффективный начальный просвет микротрещины
χ - коэффициент бокового распора
λ - безразмерный параметр длины трещины
λ_M - безразмерная критическая длина микротрещины
ν - коэффициент Пуассона
ρ - безразмерный параметр длины краевой части
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - главные компоненты напряжений
$\sigma_1^0, \sigma_2^0, \sigma_3^0$ - задаваемые главные компоненты напряжений
$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ - компоненты напряжений в плоской задаче
σ_S - прочность на одноосное сжатие
σ_t - прочность на растяжение
$\sigma_{кр}$ - критериальная величина
σ^* - "остаточная" прочность
$\sigma_n(t)$ - нормальная нагрузка на берегах трещины
$\tau_n(t)$ - сдвиговая нагрузка на берегах трещины
$\Phi(z), \Omega(z)$ - функции комплексного переменного

Глава 1.
ОТРЫВ ПРИ СЖАТИИ, КАК ОДИН ИЗ ОСНОВНЫХ ВИДОВ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТКАХ

1.1. Лабораторные эксперименты по отрывному разрушению образцов пород

Лабораторные опыты позволяют наглядно увидеть и детально анализировать некоторые особенности подготовки и развития отрыва в горной породе. Данные, полученные в лабораторных опытах, могут служить основой для построения моделей хрупкого разрушения породы в масштабе образца и в масштабе выработки.

Исторически именно лабораторные опыты по определению прочности породы на отрыв σ_t показали сложность вопроса об отрывном разрушении. Предполагалось, что величина σ_t (по аналогии с другими материалами, например, металлами) должна являться фундаментальной прочностной характеристикой конкретной породы и, следовательно, однозначно определяться из экспериментов независимо от методики их проведения. Оказалось, что это не так. Например, в [9] описаны шесть разных способов определения прочности породы на разрыв (отрыв): прямое растяжение, раздавливание образцов неправильной формы, раскалывание пластин давлением извне (соосными клиньями), раскалывание цилиндрических образцов по образующей давлением извне, раскалывание образцов давлением изнутри (способ соосных пуансонов), поперечный изгиб породных дисков, опертых по контуру.

Эти опыты, в которых несомненно фиксировалось отрывное разрушение, дали для одной и той же породы существенно разные результаты [10] . Так для гранита средние величины σ_t составляли от 4,13 МПа при разрыве образцов давлением изнутри (способ соосных пуансонов) до 15,98 МПа при раскалывании пластин давлением извне (соосными клиньями) – расхождение в 3,9 раза. Для песчаника соответствующие цифры составили от 4,75 МПа при прямом растяжении до 2,96 МПа при определении способом раздавливания образцов неправильной формы – расхождение в 6,2 раза; для известняка – от 6,13 МПа при способе соосных пуансонов до 29,2 МПа при определении способом раздавливания образцов неправильной формы – расхождение в 4,8 раза. Указанные цифры характеризуют расхождение средних, а не единичных опытов.

Причина столь больших расхождений в значениях прочности σ_t не была выяснена. Эти расхождения, бесспорно, указывали на

то, что показатели прочности горных пород на разрыв, получаемые при разных способах испытаний, не могут считаться адекватными и взаимозаменяемыми. Поэтому один из главных выводов лабораторных опытов по разрушению горных пород отрывом заключается в том, что в геомеханических оценках надо различать отрыв пород при действии напряжений растяжения в породе и отрыв при действии сжимающих напряжений. Ниже в п. 2.8 будет дано теоретическое объяснение необходимости такого различия, а далее в этом разделе будем рассматривать только то отрывное разрушение пород, которое происходит при сжатии породы.

Проведение испытаний на отрыв при сжатии требует выполнения определенных условий. Во-первых, для реализации отрывного разрушения должны выполняться условия одноосного сжатия или близкие к нему. Обозначим σ_1 и σ_3 – наибольшее и наименьшее главные сжимающие напряжения. Для того чтобы возникло отрывное разрушение, необходимо выполнение условия $\sigma_3 < 0{,}05\sigma_1$ (напряжения сжатия здесь и везде в работе считаются положительными).

Во-вторых, в образце должно иметь место однородное напряженное состояние (в масштабе образца). Выполнение этого условия необходимо также для того, чтобы результаты испытаний были представительными, и их можно было использовать в количественных оценках разрушения пород для целей практики.

Добиться условия однородности напряженного состояния можно за счет соответствующего подбора прокладок между образцом и плитами пресса. Исследованиями, проведенными во ВНИМИ и ИГД им.Скочинского (см.,например, [51,61]), установлено, что большую роль в характере разрушения образца играют контактные условия. Из-за сильного трения на контакте породы и образца даже в очень хрупких породах при одноосном сжатии образуются конусы и клинья разрушения, характерные для сдвига. В случае ослабления или устранения торцевого эффекта возникает другой механизм разрушения: вместо конических элементов в образце появляется трещина отрыва, ориентированная вдоль оси сжатия.

В качестве материала прокладок в экспериментах на отрыв при сжатии можно применять капрон, парафин, свинец, резину [61]. В ряде экспериментов использовались специальные щеточные плиты [156], которые состоят из большого числа плотно расположенных тонких стальных стержней. С одного конца они заключены в обойму, с другого – опираются на образец. Деформация образца в любом боковом направлении сопровождается изгибами стержней, практически снимающих торможение на контактной плоскости.

В изотропных породах разрушение посредством отрыва происходит в плоскости, перпендикулярной направлению действия наименьшего главного напряжения [14,51,61,69,154,157], что видно из рис. 1.1. Трещины образуются в направлении максимальной сжимающей нагрузки. Промежуточное главное напряжение имеет относительно слабое влияние как на тип разрушения, так и на значение предельной нагрузки.

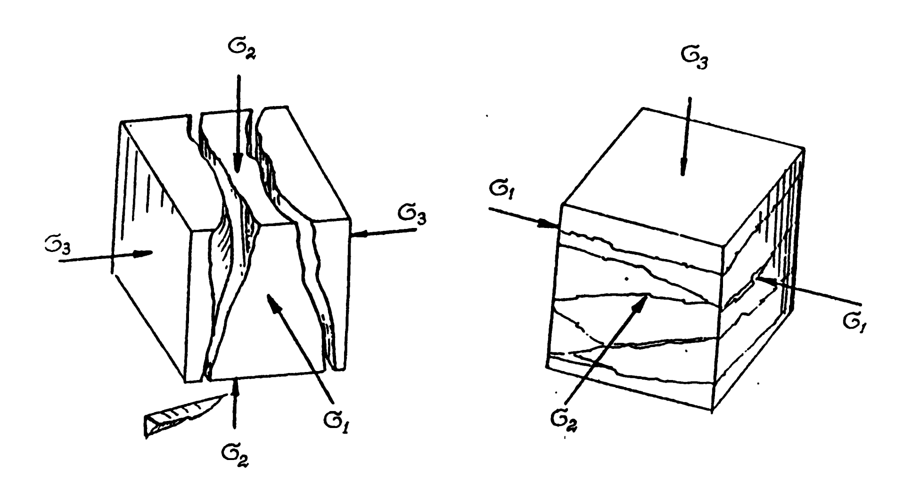


Рис. 1.1. Зарисовка разрушения образцов при трехосном неравномерном сжатии [69]

Процесс отрыва более наглядно выражен в зернистых метаморфизованных породах, причем в тех, которые можно охарактеризовать как очень хрупкие, т.е. в гранитах, базальтах, долеритах. Однако он проявляется также в некоторых осадочных породах (песчаниках, известняках, доломитах) и солях.

В некоторых горных породах отрывное разрушение происходит почти полностью по границам кристаллов или по поверхностям раздела, тогда как в других породах поверхность разрушения может проходить сквозь кристалл. Разрушение может полностью происходить по связующему материалу, например в связанном кальцитом песчанике, или по зернам, например в кварците [84].

Согласно [43,44,67,112,148], процесс трещинообразования протекает в две стадии. Первая связана с объемным накоплением микротрещин. При нагружении образца микротрещины зарождаются на границах зерен, пор, включений и у других "дефектов", которые порождают локальные растягивающие напряжения. С ростом на-

гружения происходит постепенная локализация области интенсивного развития микротрещин. Процесс развития микроразрушений идет квазистатически, поскольку рост микротрещин происходит плавно или небольшими скачками, которые порождают акустические сигналы.

Происходящие на этой стадии изменения можно обнаружить и визуально при исследовании полированных шлифов. С началом микроразрушения поверхности шлифов начинают светлеть, что связано с внутренним отражением светового луча от поверхностей границ отдельных зерен (число этих поверхностей заметно увеличивается). Л.Оберт [84] впервые обнаружил этот эффект на образцах каменной соли. Если образец каменной соли нагружать в осевом направлении и в то же время наблюдать в проходящем свете, то при достижении некоторой нагрузки начинается внутреннее отражение от поверхностей раздела кристаллов.

Вторая стадия разрушения связана с образованием макроразрыва в относительно узкой области локализации микроразрушений. Макроразрыв развивается динамически, если сохраняются условия нагружения образца.

Таким образом, двустадийность разрушения образцов породы заключается в том, что, во-первых, трещинообразование зарождается на микроуровне в некотором объеме, а завершается образованием разрыва по некоторой поверхности на более высоком масштабном уровне, во-вторых, при квазистатическом росте нагрузки микроразрушение происходит в режиме квазистатики, а развитие магистральной трещины – в динамическом режиме [22].

На поверхности отрывного разрушения по наблюдениям W.F.Brace [139] почти никогда не бывает мелких фрагментов, в то время как при явно выраженном сдвиге наблюдается сильное истирание и образование порошка вследствие смятия и срезания неровностей кристаллов или зерен [84]. Хотя поверхности двух типов разрушения относительно грубы, поверхность сдвигового разрушения обычно более близка к плоскости. В не очень хрупком образце поверхность отрывного разрушения, образованная микроразрывами и ослаблениями, может иметь причудливую форму.

Более детальное представление об отрывном и сдвиговом разрушении дает рис 1.2,а, который иллюстрирует вид разрушения цилиндрических образцов доломита при разных значениях боковой нагрузки σ_3 в двуосных испытаниях образцов на сжатие [175]. На рис. 1.2,б приведены диаграммы зависимости осевой деформации ε_1 и напряжений $\sigma_1 - \sigma_3$ при различных значениях σ_3 в МПа.

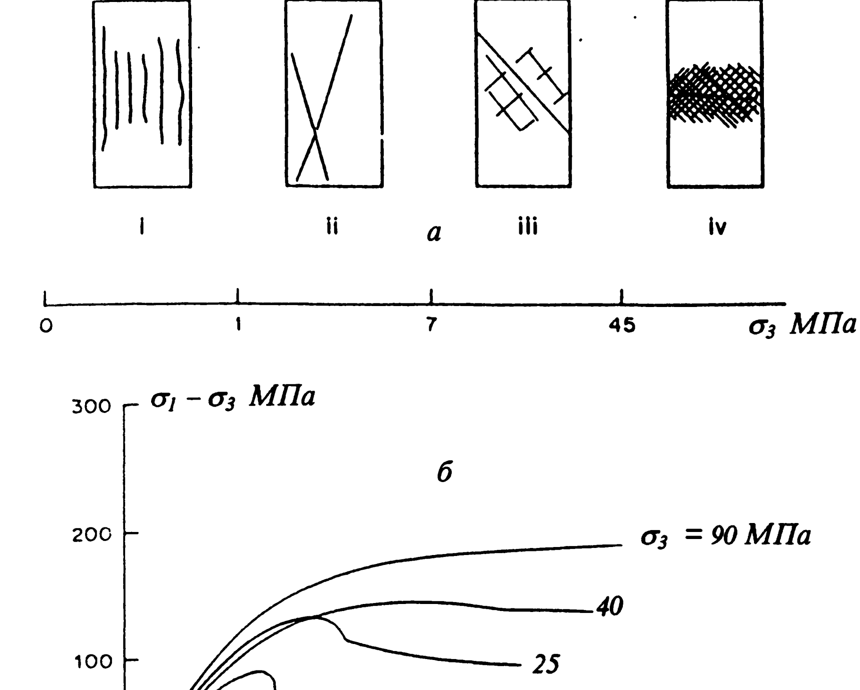


Рис. 1.2. Разрушение образцов доломита при различных значениях бокового обжатия [175]:
а – вид разрушения; б – диаграмма деформирования

Как видно из рисунков, отрыв (i) имеет место при очень малых боковых сжимающих напряжениях (<1 МПа). Это разрушение проявляется в образовании серии вертикальных поверхностей (трещин), которые исчезают у торцевых поверхностей из-за значительного сцепления на торцах (в опытах, к сожалению, условие однородности деформаций выполнялось не в полной мере). При образовании пластин в образце не заметно нарушение сцепления берегов трещин, т.е. зияние трещин отсутствует.

Разрушение (ii) имеет место при более высоких сжимающих напряжениях 1–7 МПа. В конечной, второй стадии разрушение образца происходит по плоскостям сдвига, однако эти плоскости сдвига ориентированы почти вертикально.

Разрушение (iii) происходит при значительных боковых сжимающих нагрузках (10–45 МПа). Разрушение происходит вдоль единственной плоскости сдвига, которая содержит явно выраженную "гауч-зону" (зону мелкозернистого раздробления). Плоскость сдвига более сильно отклонена от вертикали, чем в случае (ii).

Разрушение (iv) отвечает пластическому разрушению и происходит при очень больших боковых нагрузках (> 45 МПа). В этом случае заметно большое число плоскостей сдвига, которые образовались в почти горизонтальной полосе шириной 2–4 см. Но ни одна из этих плоскостей не стала плоскостью явного разрыва. Единственная плоскость разрыва с зубцеобразными выступами пересекает плоскости сдвига разных ориентаций.

Как следует из вышеизложенного, помимо явно выраженного отрывного (i) и сдвигового (iii) хрупкого разрушения образцов скальных пород имеет место и промежуточный вид хрупкого разрушения – отрыво-сдвиговой (ii). В опытах [175] он реализовался в тех случаях, когда поперечная сжимающая нагрузка на образец составляла примерно 0,07–0,1 от основной продольной сжимающей. Угол наклона плоскости разрушения к направлению максимального сжатия был заметно меньше 45°, т.е. разрушение происходило не в плоскости действия максимальных касательных напряжений. Для одной и той же породы этот угол различен в зависимости от соотношения прикладываемых продольных и поперечных нагрузок на образец.

Анализируя состояние поверхностей разрушения и зависимость угла наклона от соотношения продольной и поперечной нагрузки на образец, некоторые исследователи, например в [111,139], сделали вывод, что макросдвиг в образце в конечной стадии разрушения развивается от ступенчатого расположения микротрещин отрыва (схема разрушения показана рис. 1.3 [111]). Сначала в образце развиваются микротрещины отрыва *1*, однако они прорастают незначительно из-за большой боковой нагрузки. Другая возможная причина остановки микротрещин может заключаться в их взаимном влиянии (эффект взаимного торможения одинаково ориентированных, несоосных трещин [31]).

Если при повышении главной сжимающей нагрузки микротрещины отрыва расти не могут, то происходит сдвиговое разрушение *2*, при котором материал разрушается между концами мик-

ротрещин отрыва [31,145]. Магистральное разрушение *3* проявляется сразу во всем образце, т.е. переходит на другой масштабный уровень.

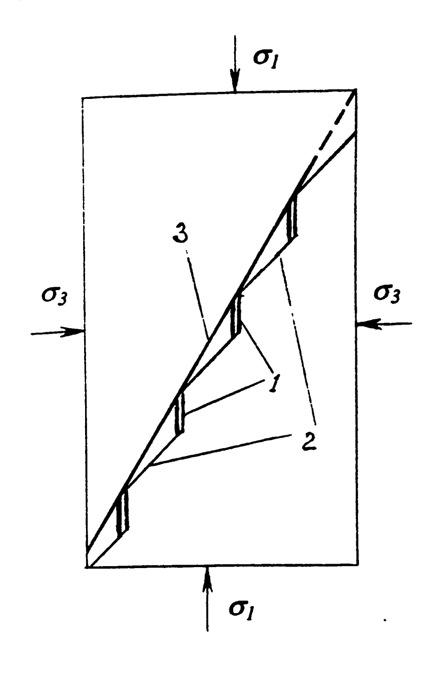


Рис. 1.3. Схема отрыво-сдвигового разрушения: 1 – эшелон микротрещин отрыва; 2 – микротрещины сдвига; 3– плоскость магистрального разрыва

Многие из установленных на небольших образцах закономерностей разрушения нашли подтверждение при лабораторном испытании образцов больших размеров [67,109]. Например, при одноосном нагружении до разрушения блока базальта размером 91,5x58,0x57,5 см было установлено, что макротрещины, которые сохранились после разрушения вблизи боковых поверхностей образца, являются трещинами отрыва. Эти трещины, располагающиеся под небольшим углом к боковой поверхности образца, вызывали коржеобразные отслоения материала. Поверхности трещин отрыва не содержали следов скольжения и смещения берегов. Были также отмечены внутренние трещины отрыва в образце.

Кроме отрывных в образце образовались трещины сдвига. Поверхности этих трещин носили явные следы скольжения. Одна часть трещин имела ступенчатый вид. Другая часть трещин образовывалась в результате объединения эшелонированной системы трещин меньшего масштаба. Размер малых элементов в этом случае составлял 2–3 см.

Разрушение образца в целом было описано как комбинированное разрушение: вблизи поверхности образца – отрывное разрушение с образованием плоских отдельностей и чешуйчатых пластин, в центральной части образца – сдвиговое разрушение с образованием магистральной трещины и прилегающей к ней зоны интенсивного дробления материала. По результатам испытаний других образцов больших размеров было сделано заключение о

большом влиянии неоднородностей различного размера на характер разрушения образцов.

Акустические исследования образцов разного размера, описанные в [67], показали, что объем образца, вообще говоря, заметно влияет на локализацию разрушения в образце. Чем больше объем, тем выше вероятность появления в нем ослабленных мест для формирования и развития очага разрушения. Наиболее существенное влияние на локализацию разрушения оказывают дефекты, размеры которых соизмеримы с размерами образца. Однородные большие образцы менее склонны к локализации разрушения.

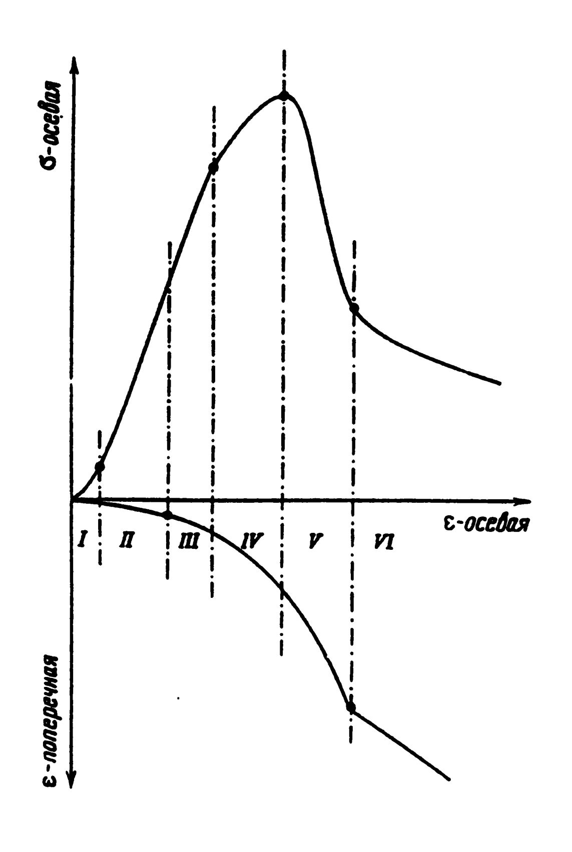


Рис. 1.4. Этапы деформирования хрупкой породы [154]

Для понимания процесса разрушения и его влияния на процесс деформирования представляют интерес особенности деформирования образцов пород под нагрузкой. При деформировании хрупкой породы выделено несколько этапов, которые определяют по кривым деформирования. Например, по кривой деформирования (рис. 1.4 [154]) можно выявить следующие этапы деформирования: *I* – нелинейный, обусловленный закрытием трещино-пор; *II* – линейно-упругий; *III* – нелинейный, связанный с началом прорастания микротрещин от "дефектов" в породе.

Нелинейный участок *IV* обусловлен образованием микротрещин и подготовкой магистрального разрыва. Запредельный участок *V* связан с развитием магистральных трещин. Запредельный

участок *VI* отражает сдвижение по образовавшимся магистральным трещинам.

Интересующие нас изменения в породе при подготовке разрушения начинают происходить на третьем этапе деформирования. На этом этапе поперечные деформации начинают расти более интенсивно, чем на предыдущих этапах. В результате опережающего роста поперечной деформации объем образцов как бы увеличивается, если сопоставлять реальное изменение объема с тем, которое следует из закона линейно-упругого деформирования. Впервые это явление, названное дилатансией, было обнаружено О.Рейнольдсом. Дилатансия детально изучалась и обсуждалась в [139–141]. В хрупких горных породах дилатансия объясняется развитием микротрещин отрыва.

Дилатансия начинается при нагрузке около 1/3–2/3 величины предельной нагрузки. В дилатирующей хрупкой породе величина кажущегося "увеличения" объема при сжатии может составлять 0,2–2 величины уменьшения объема материала, если бы он был идеально упругим. В пористом песчанике дилатансия слабо выражена. В кристаллических горных породах, таких как гранит, она проявляется весьма заметно.

Явление дилатансии указывает на то, что процесс микроразрушения может оказывать определенное влияние на деформирование горной породы. Количественная оценка такого влияния произведена, например, в [90]. В этой работе, в частности, установлено, что в зависимости от значений параметра, характеризующего дилатансию, область микроразрушений в породе может проявлять свойства как "жесткого включения", в котором напряжения концентрируются в большей степени, чем в идеально упругой породе, так и "мягкого включения".

Другой особенностью деформационной кривой хрупкой породы является пятый участок – ниспадающая ветвь кривой. Деформирование хрупкой породы на этом участке невозможно осуществить на обычном ("мягком") прессе. На "мягком" прессе при достижении предельной нагрузки имеет место бурное, динамическое разрушение. Это происходит потому, что за счет энергии деформации, аккумулированной при нагружении образца самим образцом и нагрузочным устройством, нагрузка на образец сохраняется при развитии макротрещины.

Начиная с середины 60-х гг. многие исследователи стали убеждаться в том, что динамическое разрушение не характеризует свойства породы, а является результатом конструктивных особенностей нагрузочного устройства. Более представительно для натурных

условий квазистатическое деформирование породы за пределом прочности [22].

Квазистатическое запредельное деформирование образцов пород можно осуществить на так называемых "жестких" прессах, которые работают в режиме заданных деформаций и на “мягких” прессах с устройством сервоуправления, позволяющим почти мгновенно снижать эффективное гидростатическое давление в домкрате нагрузочной машины и тем самым не допускать начала динамического процесса [160].

Если в таких испытаниях на участке *V* остановить эксперимент и вынуть образец, то в нем можно видеть макротрещины. Однако образец обычно сохраняет свою связанность и трудно разделяется на части. На другом этапе запредельного деформирования (участок *VI*) образец, как правило, разделен на части [111].

На прессах с сервоуправлением удается более тщательно исследовать запредельное деформирование. Образцы одних горных пород имеют отрицательный наклон ниспадающей ветви "нагрузка–смещение". В этом случае при снижении нагрузки деформации растут (как видно из рис. 1.4). У образцов других горных пород, например, гранитов, базальтов, ниспадающая ветвь имеет положительный наклон (при снижении нагрузки деформации уменьшаются [184]). Теоретическое объяснение такого различия в запредельном деформировании образцов пока не дано. (В гл. 2 будет сделано замечание о возможной причине этого различия).

Положительный наклон ниспадающей ветви запредельного деформирования не может быть выявлен даже на бесконечно "жестких" прессах [22]. Это обстоятельство, а также неустойчивость разрушения на "мягких" прессах, позволяют сделать следующий вывод. Особенности запредельного деформирования хрупких пород определяются, главным образом, характером нагружения, а не природными свойствами породы. Поэтому, рассматривая деформирование разрушающейся части массива горных пород, целесообразно представлять массив и разрушающуюся его часть как некоторую горную геоконструкцию, "жесткость" которой, вообще говоря, изначально не определена. Расчеты нужно проводить при различной жесткости горной геоконструкции. Суждение о реальной жесткости можно вынести из сопоставления расчетных данных и данных практики. Формальное использование в геомеханических расчетах кривой запредельного деформирования "из справочника" может привести не только к количественной, но и качественной ошибке.

Таким образом, лабораторные испытания образцов горных пород на отрывное разрушение дают возможность, с одной стороны, почувствовать сложность этого вопроса, с другой – сделать ряд

выводов, которые могут быть полезными не только при разработке теории отрывного разрушения, но и для ее приложений. В отношении нашего исследования можно сделать следующие выводы.

1. Отрывное разрушение образцов хрупких пород может происходить при действии как растягивающей, так и сжимающей нагрузки.

2. При сжимающей нагрузке отрывное разрушение пород происходит в условиях одноосного сжатия, а также при очень малом боковом обжатии образцов ($\sigma_3 < 0{,}05\sigma_1$). При более высоком боковом обжатии образцов $\sigma_3 \sim (0{,}05 \div 0{,}1)\sigma_1$ имеет место отрыво-сдвиговое разрушение, в котором на стадии подготовки разрушения главную роль играют микротрещины отрыва, а на стадии макроразрушения образуется магистральная сдвиговая трещина, соединяющая микротрещины отрыва и ориентированная под небольшим углом к направлению максимального сжатия.

3. Микротрещины отрыва в образце начинают зарождаться уже тогда, когда главное сжимающее напряжение в образце достигает примерно половины от максимально возможного.

4. Микротрещины отрыва зарождаются вблизи пор, на границах зерен, у природных микротрещин сдвига и вблизи других "дефектов". Зарождаются микротрещины во всем объеме породы, однако с дальнейшим ростом нагрузки происходит постепенная локализация микроразрушений в узкой области.

5. С повышением нагрузки микротрещины отрыва развиваются квазистатически (или малыми скачками). При постоянной нагрузке макротрещины растут динамически. Однако если нагрузка на образец будет снижаться, то возможно квазистатическое развитие магистральных трещин.

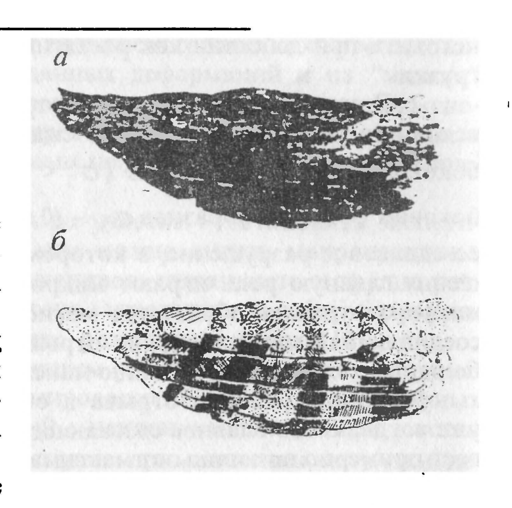
6. В хрупких породах при отрывном и при отрыво-сдвиговом разрушении берега магистральной трещины шероховаты, следы проскальзывания не обнаруживаются.

7. Даже при очень малом боковом поджатии образцов зияние в магистральных трещинах отрыва отсутствует, берега трещин находятся в соприкосновении.

1.2. Шахтные наблюдения отрывного разрушения массива горных пород

В массивах, где действуют высокие природные напряжения, на стенках и в кровле выработок имеет место особый вид разрушения хрупких пород, который проявляется в разделении породы на пластинчатые или чешуеобразные фрагменты. Эти фрагменты ориентированы вдоль поверхности выработки или выходят на по

Рис. 1.5. Отрывное разрушение породы:
а – вид чешуеобразного фрагмента, б – схема образования плоских отдельностей [180]



верхность под очень малым углом, образуя заколы. Один из фрагментов породы, рассеченный наведенными трещинами, показан на рис.1.5 [180].

Впервые подробное описание такого разрушения пород в выработках было дано в [147,151]. Это разрушение пород было определено как "раскалывание вдоль направления сжатия" (axial splitting).

Отрывное разрушение пород (или отрыво-сдвиговое разрушение, как считается в [12,24]), наиболее легко увидеть и даже услышать в процессе проходки выработок. По наблюдениям исследователей оно протекает в виде "стреляния" и "шелушения" горных пород со свежих обнажений, т.е. в виде динамического отслаивания от бортов или кровли выработок пластинок различного размера слабовыпуклой формы [12,24,40,41,66,68,94,180]. Различаются стреляние и шелушение пород лишь по интенсивности процесса (количество разрушенного материала в единицу времени, размер пластинок, звуковое сопровождение) и времени протекания процесса.

Например, на руднике "Октябрьский" Норильского горно-металлургического комбината процесс разрушения кровли и бортов выработки протекал следующим образом [66]. Непосредственно после проходки на стенках выработки имело место стреляние (другой термин "интенсивное заколообразование"). Отделение пластин сопровождалось сильным треском. Размер пластин в поперечнике составлял от 10 до 50 см при толщине от 1 до 10 см. Имелись отдельные экземпляры пластин размером 1x1x0,2 м. Это явление продолжалось в среднем 4 ч. Далее интенсивность разрушения выработки несколько затухала и наступал период "шелушения" пород, который протекал довольно вяло. Размер пластин на начальной стадии шелушения не превышал 15x15x1 см и с течением времени уменьшался до размеров монеты. Если не производилось

крепление выработок набрызг-бетоном, шелушение продолжалось в некоторых рудах больше 2-х месяцев.

На некоторых участках рудного массива в результате стреляния и шелушения выработки изменяли свою форму – сечение становилось "шатрообразным" (рис. 1.6,а).

а



б

Рис. 1.6. Шатрообразная кровля выработки после окончания процесса разрушения пород на руднике "Октябрьский" Норильского района (а) и на руднике Кольского полуострова (б)

Устойчивая шатрообразная форма не зависела от размера выработки и наблюдалась как в очистных, так и в небольших подготовительных выработках.

В России динамическое стреляние и квазистатическое шелушение пород имеют место также на рудниках Горной Шории [12] и Кольского полуострова [68]. Например, на рис.1.6,б [169] показано изменение формы выработки на одном из рудников Кольского полуострова. Локализацая разрушения в кровле объяснялась исследователями действием высоких горизонтальных тектонических напряжений.

За рубежом отрывное разрушение пород также отмечалось в различных типах пород и горно-геологических условиях: в кристаллических породах (глубокие рудники ЮАР, подземные заводы в Альпах, подземные хранилища в скандинавских странах), в солях (рудники США и Германии) и даже в меле (карьеры небольшой глубины в США) [75]. Этот вид разрушения пород на стенках и в кровле выработок не зависит от способа проведения выработок и отмечается как при буровзрывном способе, так и при при проходке выработок комбайном [177]. Отрывное разрушение имеет место и при бурении глубоких скважин [75].

Стреляние и шелушение пород на стенке выработки зависит от ориентирования выработки относительно направления действия главных компонент природного поля напряжения. Поэтому иногда на одном и том же руднике штреки, например, бывают устойчивыми по фактору стреляния, а в ортах разрушение пород проявляется весьма интенсивно [68]. Замечено также, что рассматриваемые процессы разрушения происходят в хрупких горных породах, не склонных к пластическим деформациям. При высокой природной трещиноватости массива стреляние и шелушение пород почти не проявляются или проявляются в значительно меньшей степени.

После прекращения стреляния и шелушения, т.е. после отслоения некоторой части пород, образуется относительно гладкая поверхность выработки. При бурении небольших скважин из выработки и наблюдениях за наведенной трещиноватостью из ниш в стенках выработки в массиве можно обнаружить длинные и сомкнутые трещины, которые ориентированы обычно вдоль контура выработки, т.е. перпендикулярно направлению наименьшего сжатия. Длина трещин может превышать первые метры. В масштабе выработки трещины располагаются очень близко одна к одной.

Рисунки 1.7,а,б представляют зарисовки наведенной трещиноватости массива вблизи выработок на руднике "Октябрьский" [94]. На рис. 1.7,а показана наведенная трещиноватость в случае, когда шатрообразная форма кровли не образовалась (выработка находится в области равномерного сжатия массива). На рис. 1.7,б пока-

зано начало разрушения борта выработки, оказавшейся в зоне опорного давления (конусовидное разрушение массива на левой боковой стенке).

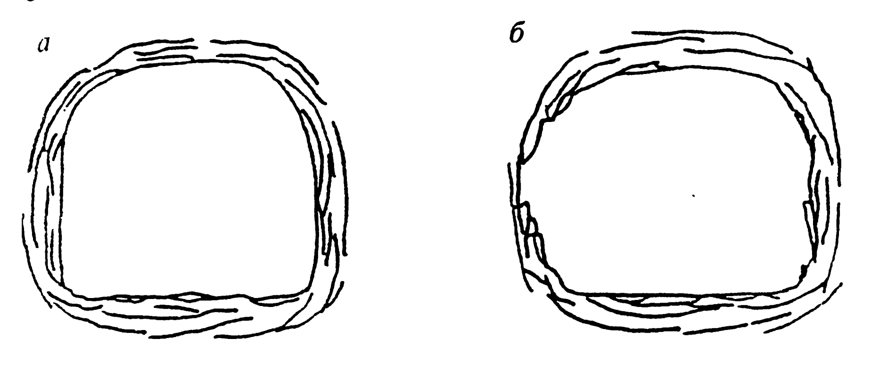


Рис.1.7.Зарисовки наведенной трещиноватости после проведения выработки (а) и при надвигании зоны опорного давления(б)

Для сравнения на рис. 1.8,а,б приведены зарисовки трещиноватости и разрушения массива вблизи тех же выработок в местах, где почва представлена сильнотрещиноватым массивом.

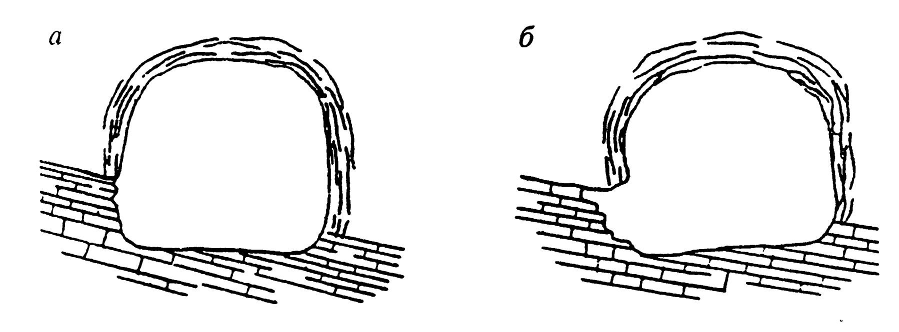


Рис. 1.8. Зарисовки трещиноватости (а) и разрушения массива (б) вблизи выработки, почва которой представлена сильнотрещиноватым массивом

В шахтных экспериментах, в которых с целью определения прочности и деформационных свойств массива выпиливались крупные блоки породы вблизи борта выработки, наиболее трещиноватые блоки можно было разбирать на относительно плоские отдельности и видеть, что берега образовавшихся трещин не со-

держат следов проскальзывания и перетертостей, что характерно для сдвигового разрушения.

Особое значение для выявления закономерностей разрушения хрупких пород вблизи выработок приобрели экспериментальные исследования, проведенные сотрудниками ИГД СО РАН и НГМК на руднике "Октябрьский" [96,130]. Изучая состояние рудного массива с помощью геофизических методов (электрометрии, ультразвукового просвечивания, плотностного гамма-гамма каротажа), они выявили эффект зональности наведенной трещиноватости вблизи выработки. Этот эффект получил название "зональная дезинтеграция горных пород".

Существо обнаруженного эффекта заключается в том, что вокруг глубоких подземных выработок наблюдается чередование зон наведенной трещиноватости и зон слабо нарушенных пород. На рис.1.9 показаны зоны наведенной трещиноватости (заштрихованы) вблизи одиночных выработок. На руднике "Октябрьский" зоны наведенной трещиноватости имеют ширину порядка 1,0 –1,5 м (диаметр выработок 3–4 м) и отделены одна от другой зонами слабо нарушенных пород шириной 1,0 –1,5 м [96].

Характерная особенность зональной дезинтеграции пород состоит в том, что в плоскости сечения выработки ориентация трещин соответствует конфигурации контура выработки. Это явно свидетельствует об отрывном разрушении массива горных пород. Число зон наведенной трещиноватости изменяется в зависимости от величины горного давления. Если на глубинах 110–140 м обнаружено всего две зоны наведенной трещиноватости, то на глубинах 1000 м таких зон, как правило, не менее трех.

Аналогичная зональность отрывного разрушения была выявлена и на глубоких рудниках Южной Африки (см. рис.1 введения и рис. 5.1). На рисунках видно, что при удалении от забоя зона сильного отрывного разрушения сменяется зоной более слабого разрушения, затем вновь следует зона сильного отрывного разрушения (зона дезинтеграции), которая сменяется зоной слабого разрушения. И так далее.

Таким образом, вблизи забоя плоской выработки интенсивность наведенной трещиноватости имеет не монотонную, а многопиковую зависимость от расстояния до забоя выработки.

Отмечая отрывной тип разрушения пород при зональной дезинтеграции, нужно обратить внимание на различие в условиях реализации отрыва при сжатии в образцах пород и в массиве. Как отмечалось в п.1.1, отрыв в образцах происходит, если отношение главных минимальной и максимальной компонент напряжений мало($\sigma_3 / \sigma_1 < 0{,}05$). В массиве (при зональной дезинтеграции)

отрыв может происходить при более высоких значениях отношения σ_3/σ_1.

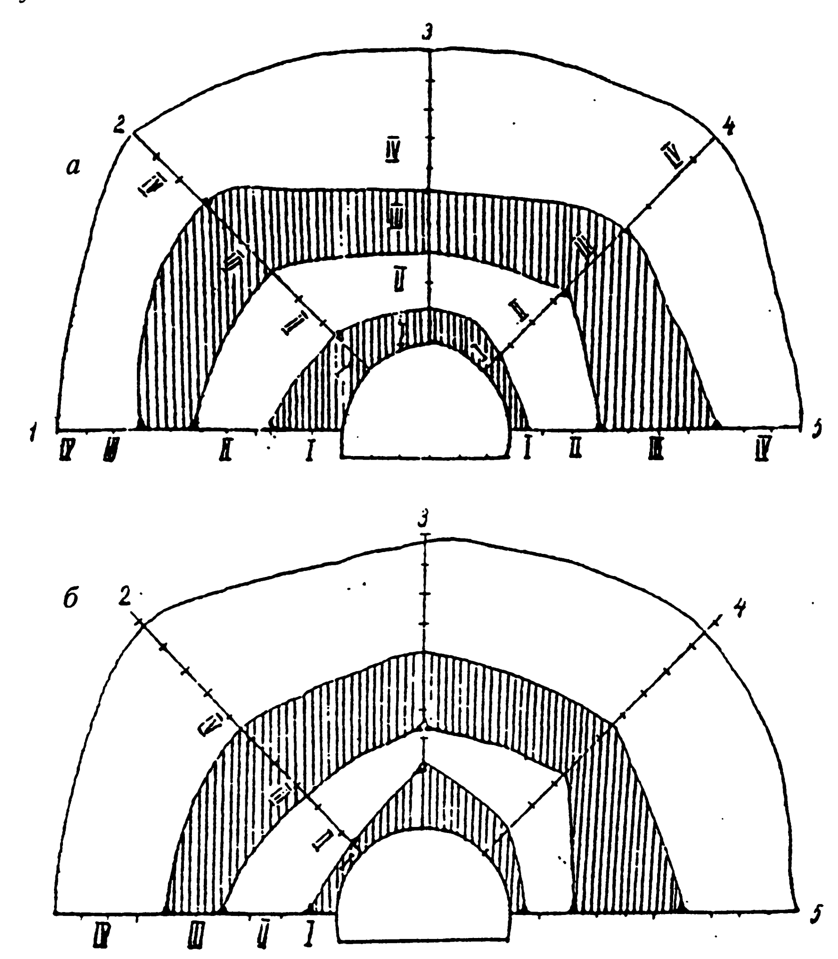


Рис.1.9. Зоны дезинтеграции пород (I, III) в различных сечениях штрека (а,б) на руднике "Октябрьский" (1,2,3,4,5 – направления скважин для исследований) [96]

Обобщая результаты натурных исследований наведенной трещиноватости, можно сделать следующие выводы.

1. Отрывное разрушение пород наиболее ярко проявляется в сильнонапряженных массивах со слабовыраженной природной трещиноватостью.

2. На стенках одиночных выработок отрывное разрушение проявляется в образовании частично связанных с массивом слабо выпуклых чешуеобразных фрагментов породы (заколов), а при снятии заколов в отслаивании тонких пластинок со стенки выработки.

3. В глубине массива образуются протяженные, закрытые трещины, приблизительно параллельные обнажению пород. Эти трещины образуют зону наведенной трещиноватости, в которой трещины расположены близко одна к другой.

4. В ряде случаев в глубине массива могут образоваться последовательно несколько зон наведенной трещиноватости, контуры которых соответствуют контуру выработки. Наведенные трещины в этих зонах описаны как трещины отрыва.

5. В массиве горных пород развитие трещин отрыва может происходить при более высоком, чем в образцах, отношении компонент напряжений σ_3 / σ_1.

1.3. Отрывное разрушение сильнотрещиноватых массивов горных пород

В этом подразделе кратко рассмотрим особенности отрывного разрушения пород при сильной природной трещиноватости массива. Сильнотрещиноватый массив характеризуется наличием нескольких систем трещин. Трещины часто имеют низкую прочность контакта берегов. При нагружении и при разгрузке массива конкретные проявления горного давления зависят от ориентации трещин, прочности и деформационных свойств контакта берегов.

В сильнотрещиноватом массиве в областях концентрации напряжений касательные напряжения могут превышать прочность трещинного контакта на сдвиг. В результате происходят подвижки по трещинам (иногда значительные). Тем не менее вдали от обнажений пород массив может сохранять свою сплошность.

Вблизи плоских обнажений пород большой площади состояние массива иное. Здесь формируются области разгрузки. В породах кровли или висячего бока могут появиться растягивающие напряжения (см., например, [58,113,142,171]). В зависимости от геометрии выработанного пространства и соотношения природных компонент напряжений растягивающие напряжения могут действовать как в направлении нормали к плоскости обнажения, так и вдоль направления простирания обнажения. Величина растя-

гивающих напряжений зависит от различных факторов. В наиболее неблагоприятных случаях она может быть соизмерима с природными напряжениями сжатия в нетронутом массиве.

Если массив достаточно монолитен и сложен прочной породой, то во многих случаях он способен выдерживать растягивающие напряжения, не разрушаясь. Если массив сильнотрещиноват, то в областях растяжения массив может расслоиться, поскольку прочность контакта берегов на разрыв обычно мала. Могут раскрыться природные трещины, ориентированные как вдоль, так и нормально поверхности обнажения.

Некоторое представление о сдвижениях сруктурных блоков и расслоении массива можно получить из модельных исследований, проведенных на ЭВМ. Рис. 1.10,а [150] отображает результаты расчета сдвижения блоков в стенке и кровле выработки в блочном массиве. Видно, что в кровле произошло небольшое расслоение (даже при очень малом пролете) и возможно выпадение центрального блока. На рис. 1.10,б показан фрагмент кровли при более протяженном пролете. Светлые участки контактов соответствуют открытым трещинам, темные – плотно сжатым берегам трещин. Ясно, что устойчивость нижнего слоя определяется только жесткостью заклинивания структурных блоков.

Область расслоения пород в массиве неустойчива и является потенциально опасной по фактору обрушения. Именно с областями расслоения связаны крупные обрушения пород кровли и висячего бока. В результате обрушения у первоначально плоского обнажения появляется кривизна, формируется свод (арка).

В зависимости от ориентации, протяженности, степени хаотичности и ломанности природных трещин может произойти обрушение сразу большого объема расслоившегося массива, либо процесс обрушения может иметь характер последовательного отрыва по природным трещинам отдельных структурных образований [85]. В первом случае обрушение почти всегда характеризуется как опасное динамическое проявление горного давления. Во втором – обрушение является медленным, менее эффектным процессом. Выпадение одного структурного блока породы с обнажения создает благоприятные условия для выпадения другого. Обрушения пород имеют небольшую мощность, однако продолжаются в течение продолжительного времени. Условием прекращения обрушений является образование такой поверхности обнажения, на которой структурные блоки породы находятся в состоянии прочного заклинивания.

Вопросы образования и расчета свода в кровле выработок давно являются предметом исследований геомехаников. Сначала эти вопросы решались полуэмпирическими методами и методами

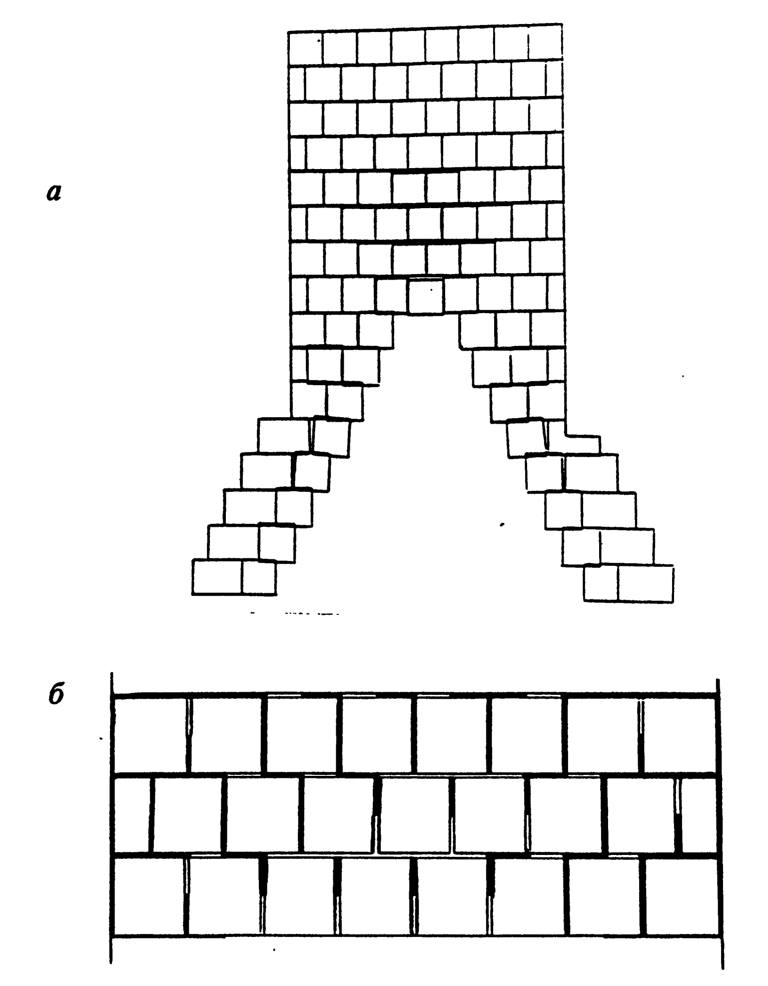


Рис. 1.10. Моделирование сдвижения структурных блоков вблизи выработки [150]:
а – общая картина сдвижения; б – образование слоя заклинившихся блоков в кровле

строительной механики (см. например, [23]). Сейчас они чаще решаются численными методами, например методом структурных элементов, по применению которого имеется большая литература (ссылки можно найти в [144,178]).

С точки зрения современной геомеханики математическое моделирование процессов сводообразования на компьютере (по подобию рис. 1.10) не вызывает методологических затруднений.

Придерживаясь основной направленности работы, отметим далее лишь те случаи отрывного разрушения трещиноватого массива горных пород, которые связаны с образованием наведенных трещин. Как показывает практика, наведенные трещины отрыва могут образовываться даже в сильнотрещиноватых скальных массивах, если выполняется следующее условие: плоскости природных тектонических трещин совпадают с площадками главных напряжений в массиве.

На рис. 1.11 видны вертикальные трещины отрыва, образовавшиеся в сильно нагруженном целике (Джезказганский рудник). Природные трещины в целике ориентированы преимущественно вдоль оси целика и перпендикулярно этой оси. Целик составлен из крупных блоков хрупкой породы. Как можно заключить из рисунка, трещины отрыва в направлении осевого сжатия целика местами развиваются по контакту между блоками, местами они пересекают блоки.

Образование трещин отрыва в целиках наблюдается на многих глубоких рудниках. С элементами отрыва разрушается центральная часть поверхности целика, где имеет место отслаивание и иногда даже "стреляние" пород. При этом целик может приобрести форму песчаных часов. Особенность приведенного здесь примера состоит в том, что процесс образования трещин отрыва может идти даже при явной трещиноватости массива.

Развитие трещин отрыва может происходить в сильно трещиноватых хрупких породах на поверхности выработок. Автор наблюдал растрескивание прочных кварцитов на пластинки в глубоких выработках на руднике им. XXII съезда КПСС (Зыряновск). В отличие от казалось бы более вероятного случая сдвижения и выпадения структурных блоков, как показано на рис.1.8,б, хрупкие и прочные кварциты разрушались отрывом вследствие следующих причин.

Кварцитовые породы, как более жесткие, при перераспределении напряжений нагружались более сильно, чем окружающие податливые породы. Кроме того, условия нагружения структурных блоков кварцитовых пород были близки к тем, что реализуются на прессах в лабораторных условиях. Структурные блоки этих пород имели вид кубиков со стороной примерно 5 –10 см. Ровные грани структурных блоков были ориентированы почти перпендикулярно направлению главной нагрузки, действующей вдоль поверхности обнажения пород в выработке. На поверхностях контактов структурных блоков имелась глинка трения. Растрескивание кварцитов



Рис.1.11. Природные и наведенные вертикальные трещины в целике (Джезказганский рудник)

протекало динамически и сопровождалось характерным звуком.

В [15] отмечался подобный характер разрушения краевой части удароопасного угольного пласта. На тех участках пласта, где угол падения трещин составлял около 30° , краевая часть даже при незначительных нагрузках быстро переходила в псевдопластиче-

ское состояние. При этом разрушение угольного массива происходило только по природным трещинам. Там, где углы падения естественых трещин составляли либо 0° , либо 90° , краевая часть угольного массива деформировалась упруго вплоть до хрупкого и бурного разрушения, связанного с образованием новых трещин.

Таким образом, можно сделать следующие выводы. В сильнотрещиноватом массиве может происходить отрывное разрушение. Обычно оно является тривиальным отрывом (при действии растягивающих напряжений). Отрыв при сжатии возможен в том случае, когда природные трещины ориентированы вдоль и вкрест действия наибольшей сжимающей нагрузки.

1.4. Наблюдения отрывного разрушения газоносных пород

Отрывное разрушение при сжатии характерно для хрупких пород. Однако оно может происходить и в нехрупких (и даже в текучих, пластичных) породах, если эти породы содержат свободный газ. При перераспределении напряжений в газонасыщенном массиве горных пород сильно сжатый свободный газ может вызвать образование микротрещин отрыва вблизи пор и содействовать объединению этих микротрещин в макротрещину. Действие свободного газа может также способствовать отрыву кусочков породы от массива и перемещению оторвавшихся частей на некоторое расстояние от обнажения пород. Процесс развития послойного отрывного разрушения иногда стихийно происходит на свежих обнажениях газоносных пород в выработке и называется выбросом породы и газа.

Выбросы породы представляют собой явно динамический процесс. Начинаются они вслед буровзрывной отбойке, когда создается свежее обнажение пород. В [83] описаны выбросы песчаника на шахтах Донбасса, которые произошли на глубине 900–1200 м. Отмечается, что песчаник при выбросах разрушается на чешуеобразные пластины, а иногда до состояния песка. В полости выброса на стенках видны края оставшихся в массиве пластин, причем пластины как бы оконтуривают полость выброса (рис.1.12). Наиболее отчетливо это видно при микровыбросах, когда объем полостей составляет не более 1 м^3.

При оборке полостей выброса можно было установить, что образовавшиеся трещины параллельны друг другу. Берега трещин были сомкнуты. Первоначально это даже дало основание считать, что трещины тектонического происхождения. Однако детальное рассмотрение поверхностей этих трещин убедило исследователей в "свежести" отрыва. Кроме того, данные о буримости на выбросо-

опасных и невыбросоопасных участках также не выявляли изначальное существование пластинчатых отдельностей в песчанике.

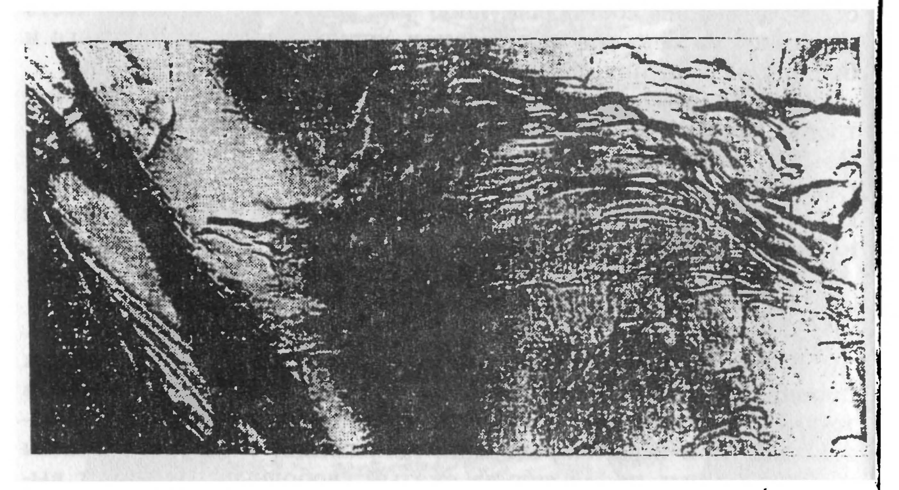


Рис. 1.12. Чешуеобразные пластинки породы на стенке полости выброса [83]

Подчеркивается особая роль газа (в рассматриваемом случае метана) в выбросах песчаника. Выбросы происходили на тех участках, которые помимо высокого горного давления отличались повышанной газоносностью. Во время выбросов происходило интенсивное выделение метана.

Аналогично описанному выше случаю разрушаются и газоносные соляные породы [102,114]. Соляной массив при выбросе разрушается на пластины выпукло-вогнутой формы, которые в свою очередь могут разрушаться до зерен и частиц пыли. Осмотр полости выброса указывает на характерную "параллельную" или "концентрическую" трещиноватость пород на стенках полости.

Отрывное разрушение углей при больших внезапных выбросах угля и газа не имеет достаточно хорошего натурного подтверждения. Отдельные частицы выброшенного угля обычно малы и часто напоминают мелкий порошок, который во Франции называют "бешенной мукой", а в Австралии "бычьей пылью". В ряде случаев материал менее измельчен и в значительной степени напоминает уголь, отбитый с помощью горнодобывающих машин или взрывов [155]. Однако в локальных выбросах на шахтах Metropolitan, Leichhardt, Cook, Moura No.2, как отмечал A.J.Hargraves [155], полости выброса имели конусоидальную форму и в них было видно слоистое разрушение угля. Плоскости разрушения были нормальны

оси конуса, наблюдалось наведенное периферийное растрескивание.

Многие исследователи убеждены, что и в процессе крупного выброса угля имеет место динамический отрыв частиц от сплошного массива [63,64,123]. Кроме того, как отмечается в [155], иногда даже перед выбросом происходит динамический отрыв кусочков угля от поверхности забоя ("стреляние угля"). Это случается в условиях высокого горного давления на забое, причем когда забой подвигается довольно быстро (механизированная выемка) и уголь вблизи него сохраняет естественную газоносность.

При участии сжатого в порах газа происходит не только динамическое, но и квазистатическое отрывное разрушение угля. На этом основано действие некоторых добычных комбайнов [45]. Подрезая уголь по окружности большого радиуса и снижая при этом сжимающие напряжения в тонком приповерхностном слое, комбайн не столько разрушает уголь своим рабочим органом, сколько способствует процессу постепенного образования и развития трещин отрыва расширяющимся газом. Происходит процесс непрерывного расслоения и откола угля без развязывания волны дробления и выброса. При работе этих комбайнов газ действует не как неуправляемый разрушитель, а производит полезную работу постепенного дробления породы [123].

В связи с обсуждением отрывного разрушения газонасыщенного угля следует отметить лабораторные опыты по моделированию внезапного выброса [119,138]. Оснащенные измерительными датчиками брикеты или кубики, выпиленные из глыб угля, помещали в ящик с твердыми стенками, где их насыщали газом и механически нагружали по трем направлениям. Резкое удаление одной из стенок ящика создавало эффект внезапного обнажения угля с высоким газосодержанием, нагруженного в двух направлениях. Происходил выброс части угля, при этом отмечался отрывной характер разрушения.

Аналогичные опыты были проведены на установке трехосного сжатия в г. Донецке [3]. В этих опытах не только моделировали процесс выброса, но и исследовали наведенную трещиноватость угля. Для экспериментов уголь отбирали из особо выбросоопасного пласта Безымянного шахты "Красный Октябрь" (Донбасс). Между нажимными плитами помещали исследуемый угольный образец, после чего испытательную камеру герметизировали и под давлением подавали в нее метан. Далее образец сжимали по принятой программе нагружения, а затем сбрасывали газ из камеры через вентиль. В результате в зажатом нажимными плитами образце оставался метан под давлением, равным давлению насыщения.

Затем мгновенно открывали специальный люк, и часть поверхности угольного образца освобождалась от нагрузки. В отверстие в нажимной плите выносилась угольная мелочь и выделялся метан, т.е. моделировался выброс. Образцы имели характерные "лунки", напоминающие полость выброса в природных условиях. Зарисовка системы ориентированных макротрещин в образце показана на рис.1.13. Из рисунка видно, что трещины отрыва в газоносном угле ориентированы так же, как и в случае разрушения негазоносных пород – плоскости трещин перпендикулярны направлению минимального сжатия σ_3 (см. рис.1.1).

Для понимания механизма разрушения газоносного угля на микроуровне представляют интерес опыты, проведенные в ИПКОН РАН [1]. В этих опытах с помощью электронно-оптического микроскопа исследовалась структура разрушения угля при механическом воздействии и изменении газосодержания. Установлено, в частности, что механизм начального микроразрушения неодинаков для углей различных структурных типов. В связи с целями нашего исследования условно можно выделить следующие механизмы микроразрушения: а) разрушение по природным эндогенным микротрещинам (угли I структурного типа); б) срастание макропор (угли II и IV структурных типов); в) начальные сдвиги большой амплитуды, провоцирующие последующее образование макропор (угли II и III структурного типа); г) чисто сдвиговое разрушение (мелкодисперсный уголь V структурного типа). В гл. 2 будут представлены математические модели развития макротрещин в газонасыщенной породе, отражающие в определенной степени механизмы микроразрушения (б) и (в).

С помощью электронно-оптического микроскопа зафиксировано образование фронта микротрещин отры-

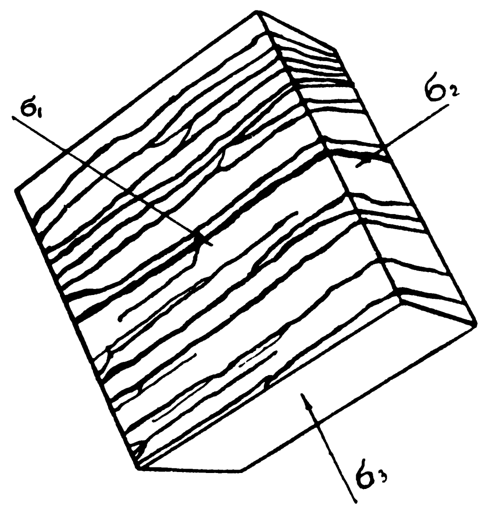


Рис. 1.13. Зарисовка макротрещин, образовавшихся в образце угля при лабораторном моделировании выброса [3]

ва при дегазации угля. По мнению исследователей образование этих трещин вызвано процессом десорбции газа. Следовательно, не только свободный, но и сорбированный газ играет определенную роль в микроразрушении угля. Поскольку микроразрушения определяют особенности макроразрушения, можно заключить, что сорбированный газ является одним из факторов, влияющих на разрушение газонасыщенного угля в природных условиях. Некоторые замечания по этому вопросу будут сделаны в п.3.5.

Подытоживая наблюдения разрушения газоносных пород и результаты лабораторных опытов, можно сделать следующие выводы.

1) Свободный газ, заключенный в порах и микротрещинах, способствует развитию трещин даже в сравнительно пластичных породах.

2) Отрывное разрушение газоносных пород имеет динамический характер и обычно связано с разрывом породы на чешуеобразные пластины и на более мелкие фракции.

3) Ориентация образующихся трещин отрыва в газоносных породах совпадает с ориентацией наведенных отрывных трещин в негазоносных породах.

4) В газоносных углях разрушение угольного вещества на микроуровне может происходить по механизму срастания крупных пор, а также по механизму опережающего развития микросдвиговых разрушений и последующего развития крупных пор. Сорбированный газ может влиять на разрушения угля.

Таким образом, из приведенных в этой главе данных экспериментов и натурных наблюдений следует, что отрыв при сжатии является достаточно распространенным типом разрушения скальных и газоносных горных пород. Однако для отрывного разрушения необходимы определенные условия, наиболее важным из которых является резко выраженная неравномерность сжатия породы.

Отрывное разрушение сопровождает некоторые опасные динамические проявления горного давления в глубоких шахтах и рудниках. Следовательно, необходимо не только продолжать дальнейшее экспериментальное изучение этого вида разрушения, но и развивать теоретические исследования, которые позволили бы создать основу для прогноза и контроля разрушения массива горных пород.

К рассмотрению теоретических вопросов отрывного разрушения мы и переходим.

Глава 2.
ТЕОРИЯ РАЗРУШЕНИЯ ОТРЫВОМ СЖАТЫХ СКАЛЬНЫХ ПОРОД

Вопросы теории отрывного разрушения горных пород при сжатии рассматривались в механике деформируемого твердого тела и в прикладных исследованиях горной направленности (см., например, [27,28,30,31,38,65,73,74,79,80,81,87,99,104,107,136,145,147, 152,157–159,161–164,168–170,172,174,176,177,179]).

В этих работах использовался различный подход к изучению механизма отрыва и принимались различные критерии отрывного разрушения. Остановимся на трех главных направлениях в развитии теории отрыва при сжатии, к которым можно свести многообразие теоретических исследований по отрывному разрушению: 1) анализ деформаций растяжения породы при сжатии; 2) микромеханический анализ напряжений и деформаций вблизи микронеоднородностей; 3) анализ развития магистральных трещин отрыва.

2.1. Деформации растяжения породы при неравномерном сжатии

Парадоксальность отрывного разрушения горных пород, как уже отмечалось, заключается в том, что отрыв может происходить в условиях всестороннего сжатия, т.е. при сжимающих напряжениях. Естественно, не в условиях равномерного сжатия, а в том случае, когда значение наибольшей компоненты сжатия намного превышает значение наименьшей компоненты , т.е. $\sigma_3 << \sigma_1$.

Если при этом условии рассмотреть упругие деформации породы, то нетрудно убедиться в том, что по крайней мере одна главная компонента деформации может быть растягивающей. Действительно, пусть образец сжимается нагрузкой σ_1 и испытывает боковое поджатие σ_2, σ_3. Тогда для главных деформаций ε_1, $\varepsilon_2, \varepsilon_3$ можно записать

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \left[\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)\right]/E, \\ \varepsilon_2 &= \left[\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)\right]/E, \\ \varepsilon_3 &= \left[\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)\right]/E, \end{aligned} \qquad (2.1)$$

где E, ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно. Из соотношения (2.1) следует, если выполняется соотношение

$\sigma_3 < \nu(\sigma_1+\sigma_2)$, то деформация ε_3 отрицательна, т.е. является деформацией растяжения (напряжение и деформация сжатия считаются здесь положительными).

Главную компоненту деформации растяжения можно рассматривать как величину, ответственную за разрушение породы при действии сжимающих напряжений. Логично считать, что при достижении предельной деформации растяжения в породе происходит отрыв. Качественно это подтверждают опытные данные: отрыв происходит по поверхности, нормаль к которой совпадает с направлением оси максимальной деформации растяжения. Таким образом, анализируя напряженно-деформированное состояние массива вблизи выработок, можно указать возможные области разрушения пород отрывом.

Выявление областей деформаций растяжения в массиве вблизи выработок и оценка геометрических параметров области разрушения по критерию максимально допустимой деформации растяжения составляют суть первого подхода к анализу отрывного разрушения. Критерий отрывного разрушения в этом анализе может иметь следующую формулировку: элемент породы считается разрушенным в результате отрыва, если хотя бы одна из главных компонент полных деформаций породы (например, пусть это будет ε_3) является деформацией растяжения и превышает критериальную для данной породы величину $\varepsilon_{кр}$

$$\left|\varepsilon_3\right| \geq \varepsilon_{кр} \; . \qquad (2.2)$$

Отрыв происходит в плоскости, перпендикулярной направлению максимальной деформации растяжения.

Прогноз отрывного разрушения с анализом деформаций растяжения производился в работах горной направленности [73,74,82,83,93, 94,176,177]. С помощью этого подхода удалось сделать несколько полезных выводов в отношении развития отрывного разрушения в скальных и газоносных породах. Некоторые результаты, полученные в [73], будут приведены в главе 4. Поскольку сделанные на основе этого подхода выводы имели не только теоретическое значение, но и содержали рекомендации для практики [73,74,177], можно сказать, что подход по растягивающим деформациям оказался достаточно работоспособным в анализе отрывного разрушения.

Наряду с критерием по деформации растяжения в оценке отрывного разрушения использовались весьма близкие по существу другие феноменологические критерии. В этой связи следует заметить, что в предположении упругости материала критерий по рас-

тягивающим деформациям (2.2) имеет вид линейной комбинации главных напряжений σ_1, σ_2, σ_3, в которой в качестве коэффициентов при главных напряжениях стоят постоянные величины. Например, если ε_3 – максимальная деформация растяжения, то разрушение отрывом, как следует из (2.1) и (2.2), имеет место, если

$$\left|\sigma_3 - \nu\sigma_2 - \nu\sigma_1\right| \geq \sigma_* \quad ,$$

где σ_* – критериальная величина, $\sigma_* = E \cdot \varepsilon_{кр}$. В этом критерии рассматриваются только напряжения.

Критерий отрывного разрушения, сформулированный в напряжениях, использовался, например, в [147]. В этой работе считается, что разрушение отрывом происходит вдоль направления действия максимального сжимающего напряжения, причем некоторая величина этого напряжения может служить критериальной величиной при описании отрыва пород. В [181] рассматривалось связанное с деформацией растяжения гипотетическое растягивающее напряжение, действующее в направлении этой деформации. Считалось, что это гипотетическое напряжение растяжения косвенно отражает проявление микроструктуры породы. В [80] приведен еще один критерий отрывного разрушения в виде линейной комбинации наибольшей и наименьшей компоненты напряжений.

Подход к отрывному разрушению, основанный на анализе деформаций (или какой-либо линейной комбинации главных напряжений) обладает рядом достоинств. Главное из них заключается в том, что критерии такого рода достаточно просто использовать при расчетах напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Особенно в тех расчетах, где требуется учесть много технологических или геологических факторов и нет возможности "вдаваться в частности".

Однако этот подход имеет и недостатки. В рамках этого подхода нельзя прогнозировать характер протекания отрывного разрушения пород (т.е. нельзя установить динамически или квазистатически будет происходить разрушение). Кроме того, не учитывается микроструктура горной породы, которая является причиной отрыва при сжатии.

Определяющая роль микроструктуры породы в подготовке и развитии отрывного и отрыво-сдвигового разрушения признана в настоящее время не только экспериментаторами, но и теоретиками. Поэтому изучение влияния микродефектов на развитие разрушения является новым, особым направлением теоретических исследований в механике горных пород. Это направление получило название микромеханики разрушения. Рассмотрим в следующем подразделе

некоторые следствия из микромеханики разрушения, которые имеют отношение к теме настоящей книги.

2.2. Микромеханика отрывного разрушения

Развитие микромеханики разрушения происходило, главным образом, за рубежом [139–141,158,159,161–166,168–170,183]. В этих работах, широко известных в механике геоматериалов и геофизике, описывались и обсуждались данные лабораторных экспериментов о закономерностях развития микротрещин в нагружаемых образцах пород. Во многих работах отмечается, что перед нагружением в однородном и изотропном образце природные микротрещины на границах минеральных зерен сравнительно однородно распределены и ориентированы произвольно, однако при нагружении породы новые микротрещины ориентируются уже в направлении действия максимального главного напряжения. С ростом нагрузки микротрещины объединяются и образуют магистральный разрыв. Аналогичные результаты приблизительно в то же время были получены в России С.Н. Журковым и В.С.Куксенко [42,43].

В основе микромеханики отрывного разрушения лежат представления о микронеоднородностях и микродефектах в породе, способных порождать вблизи себя локальные области растягивающих напряжений, в которых в свою очередь зарождаются микротрещины отрыва. Как было отмечено в п.1.1. такие области могут возникать на контактах зерен, вблизи пор, вблизи включений. Например, следуя [30,38, 104,145,148] можно рассмотреть около десяти механических схем образования микротрещин отрыва в горных породах.

Оценка условий развития микротрещин обычно производится в рамках теории разрушения Гриффитса-Ирвина. Поскольку мы также будем использовать эту теорию, рассмотрим ее основные положения.

2.2.1. *Подход к описанию разрушения.* В упрощенном виде концепцию А.А.Гриффитса о развитии трещины можно сформулировать следующим образом. Развитие трещины, т.е. разрыв силовых структурных связей, требует затраты энергии на образование свободной поверхности. Эта энергия называется поверхностной и ее величину можно считать постоянной для рассматриваемого материала.

С ростом трещины происходит приращение свободной поверхности в материале, что вызывает частичное высвобождение внутренней энергии тела. Если при бесконечно малом приращении длины трещины высвобождение внутренней энергии в теле в точ-

ности равно энергетическим затратам на образование свободной поверхности, то такая трещина является равновесной. Однако, если высвобождение внутренней энергии в теле превысит энергетические затраты на образование свободной поверхности, то трещина станет расти динамически.

Развивая энергетическую концепцию трещины А.А.Гриффитса, Дж.Р.Ирвин нашел удобную математическую форму критерия роста трещины, которую мы будем использовать. Дж.Р. Ирвин сформулировал критерий локального хрупкого разрушения (или силовой критерий), идея которого заключается в следующем.

Трещина математически представляется как разрез в упругой среде, вблизи которого происходит концентрация напряжений. Например, для случая отрыва напряженное состояние материала вблизи кончика разреза можно записать в следующем виде

$$\sigma_x = K_1(2\pi r)^{-1/2} \cos\theta/2 \cdot (1 - \sin\theta/2 \cdot \sin 3\theta/2),$$
$$\sigma_y = K_I(2\pi r)^{-1/2} \cos\theta/2 \cdot (1 + \sin\theta/2 \cdot \sin 3\theta/2), \qquad (2.3)$$
$$\tau_{xy} = K_1(2\pi r)^{-1/2} \sin\theta/2 \cdot \cos\theta/2 \cdot \sin 3\theta/2 .$$

Здесь x,y – координаты в локальной прямоугольной системе координат с центром в кончике разреза-трещины (рис. 2.1), $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$, θ – полярные координаты, K_1 – коэффициент интенсивности нормальных напряжений в кончике разреза. Этот коэффициент находится из решения задачи теории упругости для разреза, моделирующего трещину.

Как видно из (2.3) зависимость напряжений от r и θ для всех трещин отрыва в упругом теле является канонической. Напряжения вблизи края трещины сингулярны, на краю трещины они имеют степенную особенность порядка 1/2.

Можно доказать, что в упруго-хрупком материале трещина ста-

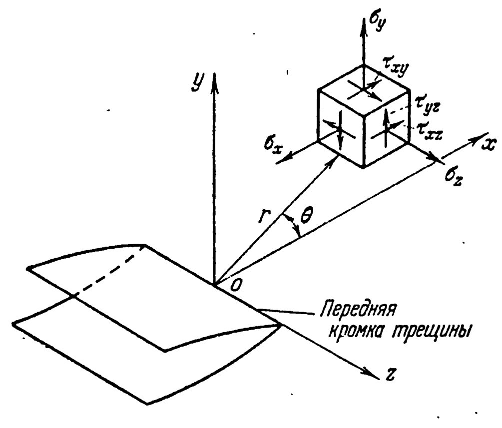


Рис. 2.1. Схема обозначений в задаче о трещине

новится предельно равновесной в смысле А.А.Гриффитса (т.е. высвобождение внутренней энергии равно затратам энергии на образование свободной поверхности), если коэффициент интенсивности напряжений K_1 становится равным критической величине K_{1c}, которая связана с величиной поверхностной энергии γ , затрачиваемой на образование единицы площади, соотношением

$$K_{1c} = \left[2\gamma E / \left(1 - \nu^2\right)\right]^{1/2}.$$

Критическое значение K_{1c} часто называют "вязкостью разрушения" материала, однако иногда в механике горных пород это значение называют также трещиностойкостью породы, подчеркивая тем самым, что K_{1c} характеризует прочностные свойства породы в отношении развития в ней трещин.

В общем случае наряду с трещинами отрыва в материале можно рассматривать трещины поперечного и продольного сдвига. В первом случае условие предельно равновесного состояния трещины получается из сопоставления коэффициента интенсивности касательных напряжений в кончике трещины K_2 с его предельной величиной K_{2c} , во втором – коэффициент интенсивности напряжений, обозначаемый K_3 , сопоставляется со своей предельной величиной K_{3c}.. Подход к исследованию равновесия трещин поперечного и продольного сдвига аналогичен подходу к исследованию трещин отрыва

Анализ равновесия микро- и макротрещин отрыва, основанный на применении критерия Гриффитса-Ирвина, заключается в следующем. Во-первых, необходимо решить задачу теории упругости для разреза, моделирующего трещину, и найти выражение для коэффициента интенсивности напряжений K_1. Это выражение включает в себя параметры нагружения и геометрии тела. Во-вторых, необходимо соотнести полученное выражение для K_1 с критическим значением K_{1c}. Если выполняется соотношение $K_1 < K_{1c}$, то трещина в рассматриваемых условиях расти не может. Если выполняется соотношение $K_1 > K_{1c}$, то рассматриваемая трещина не может находиться в равновесном состоянии при неизменной длине трещины. Если выполняется соотношение

$$K_1 = K_{1c} \, , \tag{2.4}$$

то трещина находится в предельно равновесном состоянии.

Предельно равновесное состояние может быть устойчивым или неустойчивым. Если при выполнении (2.4) справедливо

$$\partial K_1 / \partial l < 0 \quad , \tag{2.5}$$

где l – полудлина трещины, то трещина находится в устойчивом предельно равновесном состоянии. В самом деле неравенство (2.5)

означает, что приращение длины приводит трещину в недогруженное состояние при фиксированной нагрузке. Увеличение нагрузки при фиксированной длине также выводит трещину из состояния предельного равновесия в сторону недогрузки.

Если наряду с (2.4) выполняется соотношение

$$\partial K_1 / \partial l > 0 \quad , \qquad (2.6)$$

то трещина находится в неустойчивом предельно равновесном состоянии. Как увеличение нагрузки при фиксированной длине, так и увеличение длины при фиксированной нагрузки делают трещину перегруженной, т.е. выводят ее в состояние, при котором равновесие невозможно. Перегрузка трещины в данном случае неминуемо ведет к динамическому процесссу.

Критерий разрушения (2.4) по простоте и форме напоминает критерий прочности

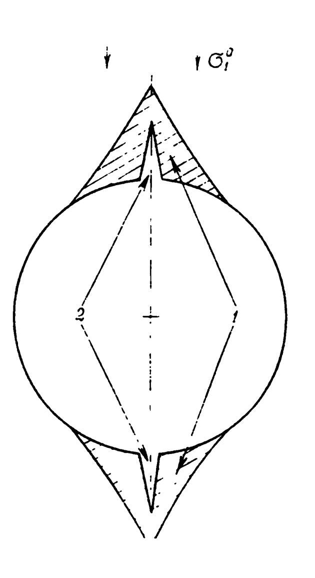
$$\sigma_{max} = \sigma_t \quad , \qquad (2.7)$$

где σ_{max} – максимальное нормальное напряжение, а σ_t – прочность материала на разрыв. Однако критерий (2.4) значительно богаче. Условие (2.7) означает лишь утверждение об исчерпании прочности. Что на самом деле произойдет, необходимо определять из дополнительных соображений. В то время как условие (2.4) конкретно означает приращение трещины. Здесь явно фигурирует, хотя и простейший, элемент разрушения. Более того, дополнительное исследование по соотношениям (2.5), (2.6) позволяет судить о динамическом или квазистатическом режиме развития трещины.

2.2.2. *Трещинопорождающие дефекты.* В рамках модели Гриффитса-Ирвина в микромеханике разрушения рассматриваются трещины, растущие от стуктурных неоднородностей в материале: от пор и мягких включений [30,136,174], от неоднородностей типа "микротрещина сдвига" [158,159,161–164,168, 169], от неоднородностей поля напряжений, вызванных внутренними напряжениями в зернах минерала [143]. Цель теоретических исследований состоит в том, чтобы качественно и количественно отразить те особенности развития микротрещин, которые наблюдаются в экспериментах. В математическом отношении наиболее разработаны модели трещин, порождаемых круглыми порами и микротрещинами сдвига.

Вблизи поры (круглого отверстия) при одноосном сжатии (или в условиях очень близких к одноосному сжатию) появляются локальные области напряжений растяжения *1* (рис. 2.2). В соответствующих работах исследовались такие вопросы, как длина микротрещин отрыва, проросших от пор, влияние микротрещиноватости на деформационные свойства породы.

Рис .2.2. Области локальных напряжений растяжения (*1*) и микротрещины отрыва (*2*) вблизи круглой поры при одноосном сжатии



Существенно большее распространение в моделировании развития микротрещин получила модель структурной неоднородности, которую можно назвать "микротрещина сдвига". Она отражает особенности влияния на развитие отрыва природных или возникающих при нагружении микротрещин, ориентированных под углом к максимальному сжимающему напряжению. Из лабораторных экспериментов [157] и аналитических исследований [57] известно, что трещина сдвига, находящаяся в поле сжимающих напряжений, может порождать на своих концах микротрещины отрыва (рис. 2.3,а).

Микротрещины отрыва отходят от порождающей их сдвиговой трещины под углом. Затем они, искривляясь, ориентируются в направлении максимального сжатия. Распирающее действие в материале, благодаря чему растут микротрещины отрыва, создается в результате проскальзывания берегов сдвиговой трещины.

Отметим, что в отношении деформирования обшим свойством трещинопорождающих дефектов является их податливость, мягкость. Энергия, затрачиваемая на рост микротрещин, черпается из области концентрации упругой энергии вблизи "мягкого" дефекта. Известно, что упругая среда с мягкими включениями при одном и том же нагружении является более энергоемкой, чем однородная упругая среда.

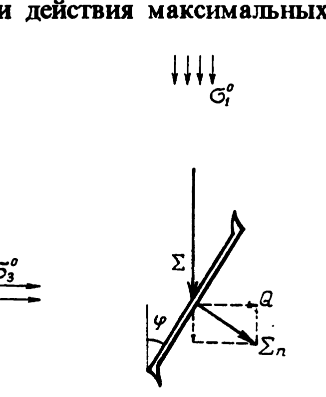
Модель неоднородности "микротрещина сдвига", как заметил S.Nemat-Nasser [169], конечно не может отразить во всех деталях механизм образования микротрещин отрыва, однако для зернистых материалов эта модель вполне работоспособна и позволяет описать основные закономерностей роста микротрещин отрыва и их влияние на деформационные свойства породы.

В ряде работ было предложено моделировать распирающее действие в сдвиговой трещине действием некоторой распирающей

нагрузки $q(x)$ (рис.2.3,б), приложенной к берегам трещины, а сдвиго-отрывную трещину моделировать открытым плоским раз-

Рис. 2.3. Схема учета действия дефекта "микротрещина сдвига": а – исходная микротрещина сдвига и концевые микротрещины отрыва; б – тонкий разрез с распределенной распирающей нагрузкой; в – разрез с сосредоточенными усилиями

резом, ориентированным в направлении действия максимальных сжимающих напряжений. Распирающую нагрузку часто представляют сосредоточенными силами Q [27,97] (рис.2.3,в). Этот прием значительно упрощает теоретическое исследование развития концевых трещин отрыва.



В рамках плоской задачи рассмотрим простую механическую схему для пояснения эффекта распирания, создаваемого микротрещиной сдвига (рис. 2.4). Пусть на микротрещину сдвига действует

Рис. 2.4. Появление распирающей силы Q на берегах микротрещины

нагрузка σ_1^0, σ_3^0 ($\sigma_1^0 >> \sigma_3^0$). Если предположить для простоты, что трение между берегами микротрещины сдвига отсутствует, то через контакт берегов микротрещины сдвига должно передаваться только нормальное усилие Σ_n, которое может быть разложено на горизонтальную и вертикальную составляющие. Распирающая (горизонтальная) сила, возникающая на микротрещине сдвига длины d в условиях двухосного сжатия и действующая нормально главной сжимающей нагрузке σ_1^0, может быть записана следующим образом :

$$Q = \left(\sigma_1^0 \cdot \sin^2 \varphi - \sigma_3^0 \cdot \cos^2 \varphi\right) d \cos \varphi \ .$$

Здесь φ – угол, который образует микротрещина сдвига с направлением действия наибольшей сжимающей нагрузки σ_1^0. Считается, что распирающая сила не зависит от длины участка взаимодействия берегов микротрещины вплоть до критического момента, когда берега микротрещины полностью выходят из зацепления.

2.2.3. *Развитие микротрещины отрыва.* Используя этот прием, рассмотрим развитие микротрещины отрыва от дефекта в условиях плоской деформации. Пусть для внешней нагрузки справедливо соотношение $\sigma_1^0 >> \sigma_3^0$. Декартову систему координат выберем так, что ее начало отнесено к середине дефекта, причем ось OX направлена вдоль направления действия наибольшей сжимающей нагрузки (см. рис. 2.3). Считаем, что дефект имеет зародышевые микротрещины отрыва, которые при росте нагрузки σ_1^0 развиваются в направлении действия этой нагрузки.

В соответствии с указанным выше приемом будем считать, что одно из действий внешней нагрузки на эквивалентную трещину отрыва (без дефекта) (рис.2.3,б) выражается в появлении некоторой распирающей нагрузки $q(x)$, распределенной на участке 2Δ, размер которого меньше или порядка размера дефекта. Другое действие внешней нагрузки выражается в сопротивлении развитию эквивалентной трещины отрыва, оказываемое поперечной нагрузкой σ_3^0 .

В этом случае условие начала роста микротрещины отрыва длины $2S$, т.е. равенство коэффициента интенсивности напряжений K_I его предельному значению K_{Ic}, приводит к следующему соотношению [80] :

$$(\pi S)^{-1/2} \int_{-\Delta}^{\Delta} q(x)(S + x)(S - x)^{-1} dx - (\pi S)^{1/2} \sigma_3^0 = K_1 = K_{1c} \cdot \quad (2.8)$$

Проведя несложные математические действия, можно убедиться в том, что, поскольку Δ фиксировано и всегда меньше S, микротрещина отрыва может быть неустойчивой только в начале своего роста, когда размер дефекта соизмерим с длиной микротрещины. По мере увеличения длины микротрещины ее рост в зависимости от нагрузки становится устойчивым. Когда длина микротрещины станет в несколько раз больше размера дефекта (при этом $|x| << S$), то (2.8) можно упростить и записать в следующем виде

$$Q / (\pi S)^{1/2} - (\pi S)^{1/2} \sigma_3^0 = K_{1c} \quad , \qquad (2.9)$$

где параметр Q, имеющий размерность силы (в случае плоской деформации), определяется соотношением

$$Q = \int_{-\Delta}^{\Delta} q(x) dx \qquad (2.10)$$

и не зависит от длины эквивалентной трещины отрыва.

В (2.9) действие дефекта фактически представлено как действие сосредоточенных сил величины Q. Таким образом анализ квазистатического роста длинной микротрещины отрыва можно провести, используя представление о действии в этой микротрещине распирающих сосредоточенных сил.

В рассмотренном примере показан один из возможных путей учета микроструктуры в поведении микротрещин. Тематика и методика исследований в микромеханике разрушения, конечно, многообразнее. Например, важным направлением в механике микроразрушения является учет взаимодействия микротрещин с оценкой эффективных деформационных характеристик [38,161].

Однако среди разнообразных методов и направлений исследований общим элементом в микромеханике является оценка поведения модельной микротрещины или ансамбля микротрещин. Результаты этой оценки составляют основу заключения о поведении некоторого представительного объема породы. Иными словами микромеханика разрушения позволяет представить механизм разрушения, как бы изучая через микроскоп поведение микротрещин и, исходя из этого, сделать некоторый прогноз в отношении макроразрушения горной породы.

Нам важно подчеркнуть, что такой прогноз не может быть удовлетворительным в отношении разрушения горных пород в масштабе выработки, поскольку поведение массива пород на этом уровне определяется особенностями поведения других объектов – магистральных разрывов (макротрещин). Разрушение массива должно рассматриваться в рамках макромеханики разрушения

горных пород, в которой изучаются особенности другой стадии разрушения пород – развитие и взаимодействие макротрещин.

В масштабе выработки нецелесообразно рассматривать некоторые детали микротрещинообразования в породе, а необходимо учесть новые факторы, характерные именно для макроразрушения. В следующем параграфе, опираясь на некоторые разработки механики микроразрушения, мы будем рассматривать макротрещины, объединяющие от нескольких единиц до несколько тысяч и более микротрещин.

2.3. Принципы построения моделей макротрещин отрыва

Объединение микротрещин в макротрещину может происходить по разным "сценариям" и приводить к качественно различному поведению макротрещины. Поскольку анализ поведения макротрещины выполняется с помощью соотношений (2.4)–(2.6) (также как и в случае микротрещины), отличие в поведении макротрещины может быть связано только с краевыми условиями в задаче о напряженно-деформированном состоянии среды вблизи разреза, моделирующего макротрещину.

Рассмотрим две группы условий, влияющих на постановку задачи. Первую группу можно охарактеризовать как упрощающие условия, которые в том или ином виде традиционно используются многими исследователями. К этой группе условий можно отнести следующие: (1) горная порода изотропна и деформируется упруго; (2) микродефекты, способные порождать микротрещины отрыва, расположены относительно далеко друг от друга (т.е. на расстоянии, превыщающим размер дефекта в три–пять раз); (3) развиваясь, микротрещина соединяется с другой микротрещиной, лежащей в той же плоскости, что и первая. Перечисленные условия незначительно искажают механику разрушения, но вместе с тем облегчают математические исследования.

Другая группа условий отражает механику проявления дефектов на поверхности макротрещины. Например, после объединения микротрещин отрыва в макротрещину распирающее действие одних дефектов в макротрещине исчезает сразу, у других оно сохраняется до определенного момента. Действительно, если микротрещина проходит через несколько пор, то распирающее действие в геоматериале создается только крайними порами. Внутренние поры являются просто неровностью берегов макротрещины. Однако распирающее действие дефектов типа "микротрещина сдвига" после их объединения макротрещиной сохраняется пока берега микротрещин сдвига не выйдут из зацепления.

Таким образом, можно рассмотреть по крайней мере два условия проявления дефектов в макротрещине. Условие (4,а) – после объединения микротрещин в макротрещину распирающее воздействие имеют только крайние дефекты, расположенные у концов макротрещины (внутренние дефекты не работают). Условие (4,б) – после объединения микротрещин в макротрещину внутренний дефект работает на распирание до тех пор, пока расхождение берегов магистральной трещины в точке расположения дефекта не превысит критической величины.

Соответственно условиям (4,а) и (4,б) можно рассмотреть две принципиально различные модели макротрещин: "поровую", в которой работают только крайние дефекты и "микротрещинную", где работает определенная часть внутренних дефектов. Как видно из дальнейшего, использование этих моделей приводит к различным качественным результатам.

В общем случае можно рассматривать комбинированные поро-микротрещинные модели и даже модели, в которых задаются не дефекты, а неровности траектории макротрещины [65]. Однако мы ограничимся только вышеуказанными принципиальными моделями. С их помощью можно качественно и количественно описать "крайние" случаи и тем самым составить некоторое качественное представление о возможных промежуточных случаях. Это вполне соответствует целям наших исследований.

Из натурных наблюдений следует, что макротрещины отрыва в сжатых породах визуально представляются закрытыми, т.е. являются трещинами с непосредственно взаимодействующими берегами. С другой стороны в некоторых условиях макротрещина может быть и открытой, например если она содержит какой-нибудь заполнитель (газ, воду). Поэтому постановка задач о макротрещинах должна учитывать как возможность механического взаимодействие берегов, так и отсутствие этого взаимодействия (условие (5)).

Распирающее действие трещинопорождающих дефектов в макротрещине можно представить при помощи распирающих сосредоточенных сил, действующих нормально к серединной оси макротрещины (условие (6)). Основанием для этого условия может служить пример предыдущего подраздела, в котором рассмотрено действие дефекта типа "микротрещина сдвига".

В общем случае наряду с распирающими силами, действующими нормально, следует рассматривать и касательные усилия. Однако, если дефекты ориентированы хаотично, то при объединении микротрещин в макротрещину распирающее действие отдельных дефектов суммируется, а сдвигающие усилия, в целом, уменьшаются. Поэтому, считая, что дефекты ориентированы в материале хаотично, в прямолинейной макротрещине касательные

усилия на ее берегах учитывать не будем (условие 7). Наличие касательных усилий в макротрещине ведет к искривлению траектории ее развития. Этот случай будет особо рассмотрен в п.2.6.

Таким образом, обсуждая принципы построения моделей макротрещин, мы специально выделяем группу условий (4–7), которые влияют на качественную сторону моделирования макроразрушения. Сопоставляя результаты моделирования и натурных наблюдений, можно более глубоко понять значение этих условий.

В заключение заметим, что следует стремиться к максимальной простоте в математической постановке задачи о макротрещине. Нецелесообразно, например, рассматривать отдельные микродефекты в макротрещине. Особенности действия дефектов должны найти отражение в усредненных граничных условиях для разреза, моделирующего макротрещину.

Модель также должна давать возможность оценки ее параметров по известным экспериментальным данным. Поэтому мы будем строить математические модели макротрещин таким образом, чтобы можно было провести расчеты равновесия макротрещин, опираясь на известные данные лабораторных опытов по трещиностойкости пород [7] и прочности пород [111].

2.4. Поровая модель

2.4.1. *Открытая трещина.* Рассмотрим модель протяженной прямолинейной трещины отрыва в сжатой хрупкой горной породе, содержащей крупные поры. В условиях плоской деформации будем рассматривать упругий материал, содержащий равноудаленные друг от друга двумерные поры одного диаметра. Пусть расстояние между порами равно S_0, диаметр пор равен d_0.

Как и ранее обозначим σ_1^0 наибольшую и σ_3^0 наименьшую главные компоненты сжимающих напряжений в материале вдали от трещины, и рассмотрим случай $\sigma_3^0 << \sigma_1^0$. Считаем, что возникающая макротрещина длины $2l$ ориентирована в направлении действия σ_1^0 (рис. 2.5,а). Введем декартову систему координат, так что ее начало отнесено к середине трещины, причем ось OX направлена вдоль направления действия нагрузки σ_1^0.

Как отмечено выше, в поровой модели "работают" лишь крайние дефекты. Распирающий эффект поры, возникающий при условии $\sigma_3^0 << \sigma_1^0$, будем моделировать фиктивными сосредоточенными силами P. Эти силы приложены в точках $x = \pm c$,

расположенных вблизи краев макротрещины так, что величина l-
является относительно малой $(l-c)/l \ll 1$. В оценках можн
считать, что величина $l-c$ равна половине среднего расстояни
между соседними дефектами, т.е. $l-c \approx S_0/2$.

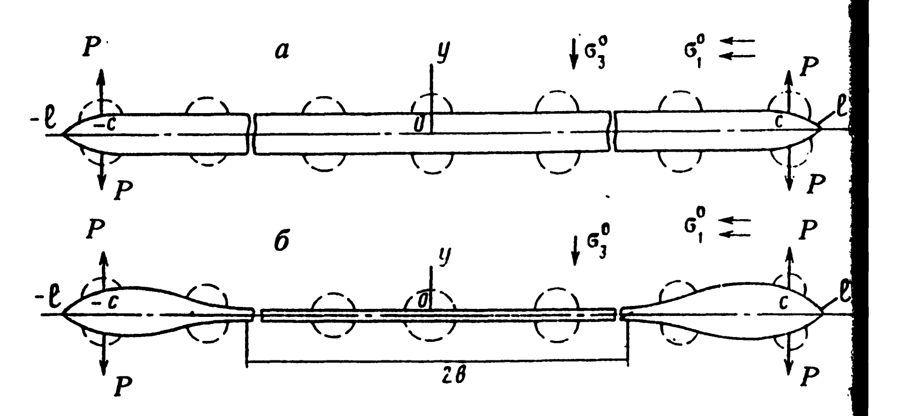


Рис. 2.5. Поровая модель. Схема к задаче о макротрещине:
а – открытая трещина; б – трещина с сомкнутыми берегами

2.4.2. *Предельно равновесное состояние открытой макротре щины.* Граничные условия в плоской задаче теории упругости дл открытой макротрещины с учетом сделанных выше упрощени могут быть записаны

на берегах трещины

$$\sigma_y(x,0) = P\delta(|x| - c), \quad \tau_{xy}(x,0) = 0, \quad |x| \le l;$$

вне трещины в плоскости $y = 0$ в силу симметрии

$$v(x,0) = 0, \qquad \tau_{xy}(x,0) = 0, \quad |x| > l.$$

Здесь σ_x, σ_y, τ_{xy}- компоненты тензора напряжений, v - компонента вектора смещения в направлении оси ОУ, $\delta(x)$ дельта функция Дирака. Условия, задаваемые на "бесконечности"

$$\sigma_x(x,y) = \sigma_1^0, \qquad \sigma_y(x,y) = \sigma_3^0, \qquad \tau_{xy}(x,y) = 0,$$
$$x^2+y^2 \to \infty. \qquad (2.11)$$

Следует задать дополнительное условие для напряжени вблизи кончика трещины. В точках $x = \pm l$, в окрестности которы происходит разрушение материала, напряжения согласно (2.3

должны иметь особенность вида $r^{-1/2}$, где r – локальный радиус с центром в кончике трещины.

Напряженное состояние плоской задачи теории упругости $\sigma_x(x,y)$, $\sigma_y(x,y)$, $\tau_{xy}(x,y)$ и перемещения $u(x,y)$ и $v(x,y)$ удобно рассчитывать с помощью функций комплексного переменного $z=x+iy$. В задаче для плоскости с прямолинейными разрезами, следуя [76], напряжения и производные по x от смещений можно выразить через две аналитические функции комплексного переменного Колосова–Мусхелишвили $\Phi(z)$ и $\Omega(z)$

$$\sigma_x+\sigma_y = 4\,Re\,\Phi(z)\ ,$$

$$\sigma_y - i\tau_{xy} = \Phi(z)+\Omega(\bar z) + (z-\bar z)\overline{\Phi'(z)}, \qquad (2.12)$$

$$(u' + iv')E/(1+\nu) = (3-4\nu)\Phi(z) - \Omega(\bar z) - (z-\bar z)\overline{\Phi'(z)}\ ,$$

где черта над буквой означает операцию сопряжения.

Решение плоской задачи теории упругости заключается в нахождении функций $\Phi(z)$ и $\Omega(z)$, используя граничные и дополнительное условия. Ради краткости изложения подробности получения этого решения здесь опущены. Их можно найти в [76]. Приведем лишь окончательные формулы

$$\Phi(z) = \frac{z}{(z^2-l^2)^{1/2}}\left[\frac{P(l^2-c^2)^{1/2}}{\pi\,(c^2-z^2)} + \frac{\sigma_3^0}{2}\right] + \frac{1}{4}(\sigma_1^0-\sigma_3^0)\ ,$$

$$\Omega(z) = \Phi(z) - (\sigma_1^0-\sigma_3^0)/2\ .$$

Используя формулы (2.12), можно найти выражение для напряжения $\sigma_y(x,0)$ в плоскости трещины при $|x|>l$

$$\sigma_y(x,0) = -\frac{x}{(x^2-l^2)^{1/2}}\left[\frac{2P(l^2-c^2)^{1/2}}{\pi(c^2-x^2)} - \sigma_3^0\right],$$

из которого следует, что коэффициент интенсивности напряжений у края трещины

$$K_1 = (\pi l)^{1/2}\left[\frac{2P}{\pi(l^2-c^2)^{1/2}} - \sigma_3^0\right].$$

Условие предельно равновесного состояния открытой макротрещины можно записать в виде

$$2P(\pi S_0)^{-1/2} - (\pi l)^{1/2}\sigma_3^0 = K_{1c}\,. \qquad (2.13)$$

Здесь в левой части не учтен член $P(S_0/\pi)^{1/2}/(4l)$ который, для протяженных трещин дает очень малый вклад, и для простоты считается $l-c = S_0/2$.

При отсутствии боковой нагрузки $\sigma_3^0 = 0$ (т.е. при одноосном сжатии) соотношение (2.13) не зависит от длины трещины $2l$. Это означает, что протяженная открытая трещина, порождаемая порами, находится в состоянии безразличного равновесия. Физически можно истолковать, что под воздействием случайных факторов такая трещина может прирастать неограничено.

При наличии бокового поджатия ситуация иная. Наличие бокового поджатия не только препятствует росту трещины (что делает предельно равновесную макотрещину устойчивой), но может привести к смыканию ее берегов. Как следует из решения, критическая длина открытой макротрещины $2l^*$, при которой только в центре трещины имеет место касание берегов, определяется соотношением $\pi\sigma_3^0 l^* = P\ln[(1+(1-c^2/l^{*2})^{1/2})/(1-(1-c^2/l^{*2})^{1/2})]$.

При смыкании берегов внутренние поры в макротрещине не будут создавать распирающее воздействие ввиду того, что макротрещина локально разгрузила материал вблизи пор в направлении наибольшего сжатия. Вблизи сомкнутой макротрещины формируется иное распределение напряжений, чем у открытой. Следовательно, условие разрушения, определяющее длину предельно равновесной трещины, а также устойчивый или неустойчивый характер ее роста, может отличаться от условия (2.13). Найдем это условие.

2.4.3. *Предельно равновесное состояние макротрещины с частично сомкнутыми берегами.* Для нахождения условия, описывающего поведение трещины в этом случае, рассмотрим задачу теории упругости для разреза с частично сомкнутыми (налегающими) берегами (рис.2.5,б).

Обсужденные выше представления о макротрещине приводят к следующим граничным условиям на берегах трещины $y = 0$; $|x| < l$ и на бесконечности

$$\begin{aligned}
&v(x,0) = 0, \qquad \tau_{xy}(x,0) = 0, \qquad |x| \le b,\\
&\sigma_y(x,0) = P\delta(|x|-c), \qquad \tau_{xy}(x,0) = 0, \qquad b < |x| \le l,\\
&\sigma_x(x,y) = \sigma_1^0, \qquad \sigma_y(x,y) = \sigma_3^0, \qquad \tau_{xy}(x,y) = 0,\\
&x^2+y^2 \to \infty. \qquad\qquad (2.14)
\end{aligned}$$

Здесь $2b$ – размер области смыкания берегов в трещине. Этот размер необходимо найти в результате решения задачи.

Следует задать дополнительные условия в точках смены вида граничных условий. На границе области смыкания $x = \pm b$ напряжения не должны иметь особенность, что определяет плавное смыкание берегов трещины $\partial v/\partial x = 0$. Вблизи края трещины напряжения должны иметь особенность вида $r^{-1/2}$.

Задача (2.14) является типичной задачей для трещин отрыва с сомкнутыми берегами. Подобные задачи рассматривались, например, в [29,124]. Решение этой плоской задачи теории упругости в функциях $\Phi(z)$, $\Omega(z)$ имеет вид

$$\Phi(z) = \frac{\left(z^2 - b^2\right)^{1/2}}{\left(z^2 - l^2\right)^{1/2}}\left[\frac{Pc\left(l^2 - c^2\right)^{1/2}}{\pi\left(c^2 - z^2\right)\left(c^2 - b^2\right)^{1/2}} + \frac{\sigma_3^0}{4}\right] + \frac{1}{4}\left(\sigma_1^0 - \sigma_3^0\right),$$

$$\Omega(z) = \Phi(z) - \left(\sigma_1^0 - \sigma_3^0\right)/2 .$$

Условие однозначности смещений дает соотношение, определяющее размер зоны контакта $2b$ через остальные параметры задачи

$$\sigma_3^0 l\left[\mathbf{E}(k) - (b/l)^2\mathbf{K}(k)\right] =$$

$$= \frac{2Pc}{\pi}\cdot\left(\frac{l^2 - c^2}{c^2 - b^2}\right)^{1/2}\int_0^\infty\left(\frac{t^2 + b^2}{t^2 + l^2}\right)^{1/2}\frac{dt}{\left(t^2 + c^2\right)} . \qquad (2.15)$$

Здесь $\mathbf{K}(k)$ и $\mathbf{E}(k)$ полные эллиптические интегралы 1-го и 2-го рода, $k = \left(l^2 - b^2\right)^{1/2}/l$.

Напряжение σ_y в плоскости трещины при $|x| > l$ определяется соотношением

$$\sigma_y(x,0) = -\left(\frac{x^2 - b^2}{x^2 - l^2}\right)^{1/2}\left[\frac{2Pc}{\pi\left(c^2 - x^2\right)}\left(\frac{l^2 - c^2}{c^2 - b^2}\right)^{1/2} - \sigma_3^0\right],$$

из которого следует, что коэффициент интенсивности напряжений у края трещины равен

$$K_1 = \left[\frac{2Pc}{\left(\pi\left(l^2 - c^2\right)\left(c^2 - b^2\right)\right)^{1/2}} - \pi^{1/2}\sigma_3^0\right]\left(l^2 - b^2\right)^{1/2}/l^{1/2} . \qquad (2.16)$$

Для предельно равновесной макротрещины должн
выполняться равенство

$$\left[2Pc\left[\pi\left(l^2-c^2\right)\left(c^2-b^2\right)\right]^{-1/2}-\pi^{1/2}\sigma_3^0\right]\left(l^2-b^2\right)^{1/2}/l^{1/2}=K_{1c}.$$

(2.17

Соотношения (2.15), (2.17), (2.5), (2.6) определяют поведени трещины под нагрузкой. Если K_1 уменьшается с длиной трещин $2l$, рост трещины устойчивый, в противном случае неустойчивы т.е. по достижении предельной нагрузки трещина начинае распространяться динамически. Чтобы выяснить характе поведения трещины рассмотрим предельные случаи касания б регов трещины и очень длинной трещины с областью смыкани распространившейся почти на всю ее длину.

В первом случае длина открытого участка трещины $l-$ практически совпадает с полудлиной трещины l, так что $b/l \ll$ Во втором случае $(l-b)/l \ll 1$. Предположим, что в обоих случая поры отстоят от края трещины на расстоянии, малом п сравнению с длиной открытого участка трещины $l-c = S_0/2$ Размеры открытой части трещины в первом случае $(l-b)_1$ и в втором $(l-b)_2$ случаях

$$(l-b)_1=S_0^{1/3}\left(\frac{2P}{\pi\sigma_3^0}\right)^{2/3}, \quad (l-b)_2=S_0^{1/3}2^{1/3}\left(\frac{P}{\pi\sigma_3^0}\right)^{2/3}.$$

Как видно из этих выражений длина открытого участк трещины меняется с длиной трещины незначительно $(l-b)_1/(l-b)_2$ 1,26. Если предположить, что поры отстоят от края трещины н расстоянии, составляющем некоторую долю длины открыто участка, то и в этом случае размер открытого участка весьма слаб зависит от длины трещины.

Коэффициент интенсивности напряжений для рассмотренны предельных случаев можно записать в виде

$$K_1=2P/\left(\pi S_0\right)^{1/2}-A\left[\pi(l-b)\right]^{1/2}\sigma_3^0,$$

где $A = A(b/l)$ принимает значение 1 в первом случае и $2^{1/2}$ в втором. Отсюда следует, что рост частично сомкнуто макротрещины в сравнении с открытой трещиной происходит очень слабой устойчивостью. Если нагрузка достигает кри тического значения, что может быть, например, за счет роста P пр

постоянном σ_3^0 или при постоянном P за счет уменьшения σ_3^0, то для дальнейшего развития трещины достаточно лишь незначительной догрузки.

2.4.4. *Параметры модели.* Последнее выражение для K_I можно записать в другом виде. В первый член правой части входит величина S_0, которая характеризует частоту расположения пор и в рамках рассмотренной модели считается постоянной величиной. Для линейно-упругого материала в первом приближении можно считать, что распирающая сила P линейно зависит от нагрузки. Поскольку $\sigma_1^0 >> \sigma_3^0$, то можно принять, что P зависит только от наибольшей сжимающей нагрузки σ_1^0. Поэтому первый член в K_I можно записать в виде

$$2P / (\pi S_0)^{1/2} = \sigma_1^0 (\pi d_* / 2)^{1/2}, \qquad (2.18)$$

где постоянную d_*, имеющую размерность длины и косвенно отражающую распирающее воздействие поры (дефекта), логично назвать эффективным размером трещинопорождающего дефекта.

При одноосном сжатии условие начала развития магистральной трещины фактически является условием макроразрушения породы. Поскольку это имеет место при достижении прочности породы на сжатие σ_S, можно записать

$$K_{1c} = \sigma_S (\pi d_* / 2)^{1/2}.$$

Отсюда можно получить соотношение для оценки величины эффективного размера трещинопорождающего дефекта

$$d_* = 2K_{1c}^2 / \left[\pi \sigma_S^2\right]. \qquad (2.19)$$

Заметим, что диаметр поры d_0 и эффективный размер d_* трещинопорождающего дефекта (в данном случае тоже поры) суть разные величины, хотя они характеризуют одну и ту же микроструктуру породы. Диаметр d_0 определяется из непосредственного анализа микроструктуры, а d_* вводится с помощью "обратного анализа" результатов испытаний на прочность. По порядку величины d_0 и d_* должны, очевидно, соответствовать друг другу.

Таким образом, условие предельно равновесного состояния макротрещины можно записать в виде соотношения

$$K_{1c} = \sigma_1^0 (\pi d_* / 2)^{1/2} - A \left[\pi(l - b)\right]^{1/2} \sigma_3^0, \qquad (2.20)$$

которое далее можно привести к виду

$$\sigma_1^0 - \beta \sigma_3^0 = \sigma_S , \qquad (2.21)$$

где безразмерный коэффициент β при нагрузке σ_3^0 определяется выражением

$$\beta = A(b/l) [\ 2(l-b)/ d_*]^{1/2}.$$

Аналогично (2.21) можно записать соотношение (2.13) для открытых трещин. Отличие будет состоять лишь в том, что коэффициент β в последнем случае будет представлен выражением $\beta = (2l/ d_*)^{1/2}$.

Таким образом, для крупнопористых хрупких горных пород критериальное соотношение, определяющее развитие отрывного разрушения при сжатии (как в виде открытых, так и закрытых трещин) представляется комбинацией наибольшей и наименьшей компонент главных напряжений, прочности породы на одноосное сжатие, а также параметра, зависящего от длины трещин.

В отношении разрушения с образованием частично закрытых отрывных трещин можно заключить следующее. Для закрывающихся трещин β с длиной трещины меняется очень слабо (уменьшается примерно в 1,4 раза). В практических приложениях целесообразно считать этот коэффициент постоянной величиной. Несложно оценить значение β для длинных трещин. При $l \to \infty$ для длинных частично закрытых трещин находим

$$\beta = \left[4S_0\sigma_1^0 / \left(d_*\sigma_3^0\right)\right]^{1/3} .$$

Поэтому соотношение между компонентами главных напряжений в сжатой крупнопористой породе с длинными частично закрытыми трещинами приближенно может быть записано в виде

$$\sigma_1^0 - \left[4S_0\sigma_1^0 / \left(d_*\sigma_3^0\right)\right]^{1/3} \sigma_3^0 = \sigma_S . \qquad (2.22)$$

Соотношение (2.22) можно истолковать как критерий отрывного разрушения пористой среды в напряжениях, который описывает заключительную стадию разрушения – образование протяженных макротрещин.

Параметры поровой модели макротрещины для конкретной породы можно оценить, если располагать результатами испытаний на разрушение соответствующих образцов породы и знать значение трещиностойкости породы. Эффективный размер трещинопорождающего дефекта d_* можно найти с помощью соотношения (2.19). Определив величину S_0 по данным

микроструктурного анализа, величину фиктивной силы P при заданной нагрузке σ_1^0 можно найти из соотношения (2.18)

$$P = (\pi S_0)^{1/2} K_{1c} / 2 .$$

2.4.5. *Выводы.* Поровая модель макротрещины описывает поведение протяженных трещины отрыва в хрупких крупнопористых горных породах. В отношении развития макротрещин поровая модель позволяет установить следующие закономерности.

1. Если отношение минимальной главной компоненты напряжений к максимальной составляет несколько процентов, то макротрещина, оставаясь полностью открытой, вырастает до некоторой величины и останавливается.

2. Если отношение минимальной главной компоненты напряжений к максимальной составляет около одного процента, то макротрещина может закрыться в средней части раньше остановки роста. Дальнейшее развитие этой трещины может происходить за счет автономного роста концов трещины: в кончике трещины имеет место разрыв материала с расхождением берегов разрыва и на некотором удалении от конца одновременно трещина закрывается. При этом раскрытый участок с ростом трещины приблизительно сохраняет свой размер.

3. Рост макротрещины с частично сомкнутыми берегами происходит со слабой устойчивостью. Достаточно протяженная макротрещина находится в состоянии безразличного равновесия. Это означает, что ее рост может происходить под воздействием незначительных и случайных факторов.

4. Закрытие протяженной макротрещины ведет к восстановлению вблизи трещины исходного напряженного состояния. Следовательно, появляется возможность образования вблизи закрытой трещины другой закрытой трещины, ориентированной в том же направлении. В результате может сформироваться структура параллельных, близкорасположенных магистральных трещин отрыва.

Если соотношение наибольшей и наименьшей компонент напряжений составляет несколько процентов, то из анализа полученных соотношений следует, что условие остановки открытой макротрещины выполняется скорее, чем условие смыкания ее берегов. В этом случае может происходить образование эшелона трещин отрыва и вероятно последующее сдвиговое разрушение, т.е. реализуется механизм отрыво-сдвигового разрушения горных пород, который обсуждался в работах [31, 145].

Поровая модель макротрещины отрыва, в принципе, может быть использована для описания развития трещин отрыва при сжатии в материалах без явных дефектов. В работе [100]

описываются эксперименты с трещинами отрыва в стекле при одноосном сжатии. Замечено, что наибольшее расхождение берегов имеет место в непосредственной близости от кончика трещины. Развитие трещины связывается с образованием наведенной неоднородности материала в кончике трещины (крейз-зоны).

Чтобы использовать рассмотренную выше поровую модель для описания отрывного разрушения "бездефектных" материалов, надо использовать условие равновесие трещины в виде (2.20), в котором d_* можно определить как эффективный размер зоны наведенной неоднородности, образующейся у кончика трещины и вызывающей появление локальных напряжений растяжения.

В заключение необходимо заметить, что J.Gramberg в [152] для анализа отрывного разрушения сжатых горных пород рассмотрел модель макротрещины отрыва, в которой наличие растягивающих напряжений в кончике трещины объясняется особой конфигурацией (закругленностью) кончика трещины. Такой подход по сути совпадает с подходом работы [100] для объяснения развития трещин отрыва в стекле. Действительно, и в этом случае развитие трещины связывается с некоторой особенностью, находящейся в самом кончике открытой трещины.

Модель, описанную в [152], в математическом отношении можно рассматривать как частный случай поровой модели. Однако ни та, ни другая модель не могут объяснить некоторые закономерности распространения макротрещин отрыва в скальных породах. Например, с помощью этих моделей трудно объяснить динамику развития трещин, а следовательно, динамические явления в скальных породах, в частности стреляние пород. Для того, чтобы объяснить многие закономерности трещинообразования в скальных породах необходимо рассмотреть другую модель макротрещины.

2.5. Микротрещинная модель

2.5.1. *Основные положения.* В микротрещинной модели считается, что дефектами, порождающими макротрещину отрыва, являются микротрещины сдвига. “Микротрещина сдвига”, вообще говоря, условное название дефекта, однако наиболее вероятно, что микросдвиговые нарушения являются основными трещинопорождающими дефектами в породе с плотной зернистой структурой.

Действительно, в плотной горной породе, которая содержит прочные минеральные зерна, разрушение должно начинаться на конактах зерен. Развитию чистого сдвига препятствуют сами же зерна. Микротрещины сдвига прорастают до крупных прочных

зерен и останавливаются. В этом случае из концов микротрещин сдвига начинают развиваться микротрещины отрыва по контакту зерен. Таким образом, изначально микротрещины сдвига могут и не существовать в большом количестве. Они появляются в начальной стадии микроразрушения.

Рассмотрим в условиях плоской деформации микротрещины сдвига, которые объединились в макротрещину, расположенную вдоль оси ОХ (рис. 2.6,а). Расстояние между центрами сдвиговых микротрещин (дефектов) обозначим S_0, длину микротрещин сдвига обозначим d. На рисунке для простоты показана одинаковая ориентация микротрещин сдвига относительно осевой линии

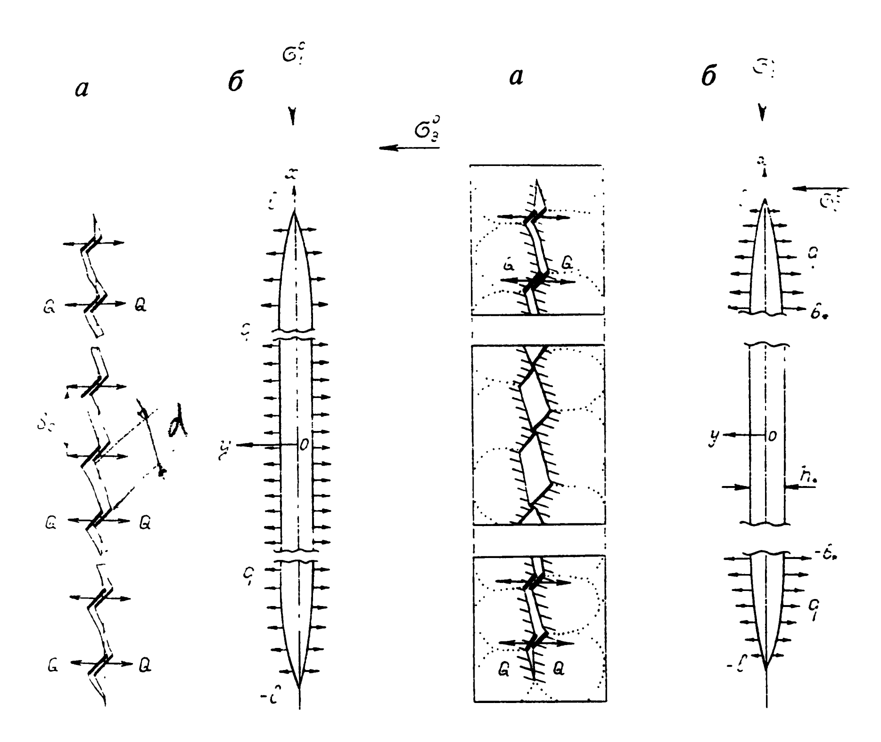


Рис. 2.6. Микротрещинная модель. Короткая макротрещина; а – распирающие усилия в макротрещине; б – представление макротрещины в задаче о равновесном состоянии

Рис. 2.7. Длинная макротрещина:
а – распирающие усилия в макротрещине; б – представление макротрещины в задаче о равновесном состоянии

(микротрещины наклонены под одним углом).

Будем считать, что микротрещины расположены сравнительно далеко друг от друга, а материал на макроуровне является однородным и изотропным.

Распирающее действие у дефектов типа "микротрещина сдвига", возникающее при действии сжимающей нагрузки σ_1^0, σ_3^0 ($\sigma_1^0 \gg \sigma_3^0$), может быть моделировано введением распирающих сосредоточенных сил Q (это отмечалось в 2.2).

Поведение макротрещины при нагружении обусловлено проявлением распирающего эффекта микротрещин сдвига. Этот эффект в макротрещине сохраняется до тех пор, пока макротрещина не станет настолько длинной, что ее берега выйдут из зацепления. Вышедшие из зацепления берега при последующем деформировании материала остаются разошедшимися, при этом точечный контакт берегов макротрещины сохраняется (рис. 2.7,а (центральная часть трещины)).

Таким образом, при рассмотрении макротрещин следует выделять: а) короткие макротрещины, у которых все дефекты, объединенные в макротрещину, оказывают распирающее действие (см. рис. 2.6,а); б) длинные макротрещины, в которых распирающее действие дефектов в центральной части исчезло, но остается в концевых частях макротрещины (см. рис. 2.7,а). Минимальную длину длинной или максимальную длину короткой макротрещины, у которой только в самом центре достигается предельное смещение берегов и исчезает распирающее действие дефектов, будем называть критической длиной макротрещины и обозначать $2l_*$.

2.5.2. *Постановка задачи о макротрещине.* В рамках плоской задачи теории упругости рассмотрим задачу о равновесии в неограниченной среде прямолинейного разреза, моделирующего макротрещину (рис. 2.6,б). Влияние неоднородностей (микротрещин сдвига) отразим выбором соответствующих граничных условий. Макротрещина ориентирована вдоль направления максимального сжатия σ_1^0. В декартовой системе координат ХОУ с началом в центре трещины и осью ОХ направленной вдоль трещины граничные условия "на бесконечности" имеют такой же вид, как в (2.11).

В макротрещине, образовавшейся в результате слияния большого числа микротрещин, учитывать индивидуально сосредоточенные силы Q нецелесообразно. В той части макротрещины, где создается распирающий эффект, удобнее ввести распределенную распирающую нагрузку q, полагая $q=Q/S_0$. Такая замена

упростит математические выкладки, сохраняя качественные особенности поведения макротрещины.

Поэтому для короткой макротрещины считаем, что трещина нагружена однородно распределенной нормальной нагрузкой q, которую будем считать линейно связаной с главными напряжениями σ_1^0 и σ_3^0, т.е. $q = \gamma_1\sigma_1^0 + (1-\gamma_3)\sigma_3^0$, где γ_1 и γ_3 постоянные модели. Выбор коэффициента во втором члене правой части связан с удобством записи последующих формул. Граничные условия на берегах короткой трещины и условия на ее продолжении запишем в виде

$$\sigma_y(x,0) = q, \quad \tau_{xy}(x,0) = 0, \quad |x| \le l,$$
$$v(x,0) = 0, \quad \tau_{xy}(x,0) = 0, \quad |x| > l, \qquad (2.23)$$

где l – полудлина трещины. Вблизи точек $x = \pm l$ напряжения должны иметь корневую особенность $r^{-1/2}$ (r – локальный радиус с центром в кончике трещины). С точки зрения условий нагружения задача (2.23) является самой простой задачей о трещине.

В достаточно длинной макротрещине условия на ее берегах будут другими (рис. 2.7,б). В центральной части длинной макротрещины распирающее действие на берегах пропадает вследствие выхода из зацепления зубцов микротрещин. Расхождение берегов в этом месте достигает некоторого критического значения h_*, которое принимается в качестве структурного параметра породы. Распирающее действие дефектов остается лишь там, где расхождение берегов меньше критического h_*.

Предположим, что в центральной части макротрещины $|x| \le b_*$, где b_* – граница области критического расхождения берегов, расхождение берегов всюду равно критическому. Это предположение оправдано решением задачи о трещине, нагруженной только на периферии ($b_* < |x| < l$) постоянной распределенной нагрузкой $\sigma_y = q$. Из решения этой задачи следует, что в центральной части трещины, где нагрузка отсутствует, расхождение меньше, чем в области действия нагрузки. Таким образом как короткая, так и длинная макротрещина отрыва не имеют просветов и внешне выглядят закрытыми, что соответствует наблюдениям природных макротрещин отрыва вблизи горных выработок (см. п. 1.2.).

Граничные условия на берегах длинной макротрещины будут иметь вид

$$\tau_{xy}(x,0) = 0, \quad |x| \le l,$$
$$\sigma_y(x,0) = q \equiv \gamma_1\sigma_1^0 + (1-\gamma_3)\sigma_3^0, \quad b_* \le |x| \le l, \qquad (2.24)$$
$$v(x,0) = -h_*/2, \quad |x| \le b_*.$$

Вблизи точек $x = \pm\ l$ напряжения должны иметь корневую особенность, а вблизи точек $x = \pm\ b_*$ напряжения ограничены.

2.5.3. *Решение задачи о равновесии макротрещины.* Задача (2.23) для короткой макротрещины по существу не отличается от той, для которой приведено общее выражение коэффициента интенсивности напряжений (2.8). Поэтому подставляя в (2.8) вместо Δ и S полудлину макротрещины l (нагрузка задана по всей длине трещины), а также полагая $q = \gamma_1 \sigma_1^0 + (1 - \gamma_3)\sigma_3^0$, находим, что коэффициент интенсивности для короткой макротрещины равен

$$K_1 = (\pi\ l)^{1/2} (\gamma_1 \sigma_1^0 - \gamma_3 \sigma_3^0). \qquad (2.25)$$

Критическую длину макротрещины $2l_*$, при которой в центре трещины расхождение берегов достигает критической величины h_*, несложно определить, воспользовавшись известной формулой для смещения берегов однородно нагруженной трещины [98]

$$l_* = h_* E / \left[4(1 - \nu^2)(\gamma_1 \sigma_1^0 - \gamma_3 \sigma_3^0)\right]. \qquad (2.26)$$

Решение задачи для длинной макротрещины не описывается (2.8). Ее решение может быть получено методом, изложенным в [76]. С учетом того, что в точках $x = \pm\ b_*$ материал уже разрушен и напряжения там должны быть ограниченными, решение задачи для длинной макротрещины в функциях $\Phi(z)$ и $\Omega(z)$ может быть записано в виде

$$\Phi(z) = \frac{-(z^2 - b_*^2)^{1/2} (\gamma_1 \sigma_1^0 - \gamma_3 \sigma_3^0)}{2\,(z^2 - l^2)^{1/2}} + \left[(2\gamma_1 + 1)\sigma_1^0 - (2\gamma_3 + 1)\sigma_3^0\right] / 4\ ,$$

$$\Omega(z) = \Phi(z) - (\sigma_1^0 - \sigma_3^0)/2\ .$$

С помощью соотношений (2.12) и (2.3) для коэффициента интенсивности напряжений K_1 находим

$$K_1 = (\gamma_1 \sigma_1^0 - \gamma_3 \sigma_3^0)[\pi (l^2 - b_*^2)/l]^{1/2}\ .$$

Это выражение содержит два неизвестных параметра: полудлину макротрещины l и длину области $2b_*$, в которой распирающее действие дефектов не проявляется. Параметры l и b_* должны быть определены из дополнительных условий. Одно из них следует из постановки задачи $v(b_*, 0) = -h_*/2$ и приводит к соотношению

$$l_* / l = \mathbf{E}(k) - (1-k^2)\mathbf{K}(k),$$

где $k = (l^2 - b_*^2)^{1/2} / l$; $\mathbf{K}(k)$, $\mathbf{E}(k)$ – полные эллиптические интегралы первого и второго рода соответственно. Из этого соотношения можно получить графическую зависимость b_* от полудлины l (рис. 2.8).

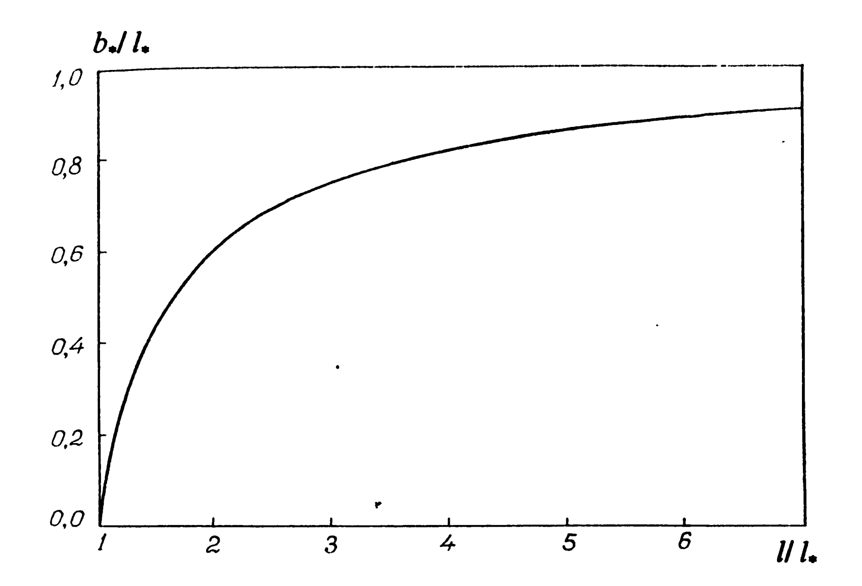


Рис. 2.8. Зависимость приведенной полудлины области критического расхождения берегов от полудлины макротрещины

Другим условием является критерий разрушения, который для длинной макротрещины имеет вид

$$K_{1c} = (\gamma_1 \sigma_1^0 - \gamma_3 \sigma_3^0)[\pi (l^2 - b_*^2)/l]^{1/2}. \qquad (2.27)$$

Предположение о предельном расхождении берегов в центральной части длинной макротрещины оправдывается тем, что напряжения там даже в отсутствии бокового поджатия ($\sigma_3^0 = 0$) оказываются сжимающими. В самом деле для напряжений σ_y в центральной части $|x| < b_*$ нетрудно получить

$$\sigma_y(x,0) = \gamma_1 \sigma_1^0 [1-(b_*^2 - x^2)^{1/2} (l^2 - x^2)^{-1/2}] > 0 .$$

Можно также убедиться в том, что в периферийных частях трещины расхождение берегов не превосходит предельное значе-

ние. Таким образом, берега макротрещины отрыва взаимодействуют по всей ее длине и трещина должна выглядеть закрытой.

2.5.4. *Анализ поведения макротрещины отрыва.* Из соотношения (2.25) следует, что для короткой трещины K_I растет с ростом трещины пропорционально $l^{1/2}$. Следовательно, короткая трещина неустойчива. В длинной макротрещине коэффициент интенсивности напряжений K_I также растет с ростом трещины, но очень незначительно. Например, из соответствующего соотношения для K_I нетрудно найти, что при изменении длины трещины от критической $2\,l_*$ до бесконечности коэффициент интенсивности напряжений возрастает всего в 1,13 раза.

С ростом длины достаточно протяженной трещины K_I перестает зависеть от длины и стремится к постоянной величине $2l_*^{1/2}(\gamma_1\sigma_1^0 - \gamma_3\sigma_3^0)$. Это означает, что очень длинная макротрещина находится в состоянии, близком к безразличному равновесию. Таким образом, из анализа выражений для коэффициента интенсивности напряжений можно заключить следующее.

1. Короткая макротрещина неустойчива. Объединение микротрещин в макротрещину отрыва приводит к смене режима разрушения (от квазистатического к динамическому). Начало динамического процесса разрушения соответствует достижению прочности породы.

2. Когда берега микротрещин сдвига в центре макротрещины начинают выходить из зацепления и пропадает их распирающее действие, изменяются условия развития макротрещины. Они становятся менее благоприятными для ее роста. Длина достаточно длинной прямолинейной макротрещины фактически не оказывает влияния на ее рост. Можно сказать, что длинная макротрещина подрастает как-бы за счет автономного продвижения ее концов.

Изменение условий развития макротрещины определяет масштабный эффект в отрывном разрушении горных пород, обсуждаемый в п. 2.7.

2.5.5. *Оценка параметров модели.* В модель макротрещины входят параметры, связанные с микроструктурой среды. По порядку величины значение h_* соответствует линейному размеру дефекта. В геоматериале с зернистой структурой этот параметр можно оценить по диаметру крупных зерен d_{max} В грубой оценке можно считать $h_* \approx d_{max}$.

Необходимо оценить минимальную длину цепочки соединенных микротрещин, которую уже можно считать макротрещиной.

Вообще говоря, в идеализированном геоматериале неустойчивое развитие трещины отрыва должно начинаться с объединения микротрещин отрыва от двух сдвиговых трещин (как показано в [27]). Для реальной горной породы с зернистой структурой целесообразно считать, что минимальный размер неустойчивой макротрещины отрыва $2l_M$ составляет до десяти длин возможных микротрещин сдвига между зернами, иначе этот размер составляет несколько длин крупных зерен $2l_M \sim (5 \div 10)\, d_{max}$.

Если при одноосном нагружении достигается прочность породы σ_S, то согласно рассмотренной модели макротрещины, должно выполняться соотношение

$$K_{1c} = (\pi\, l_M)^{1/2}\, \gamma_1 \sigma_S\ , \qquad (2.28)$$

из которого находим выражение для оценки γ_1

$$\gamma_1 = K_{1c} / [\sigma_S (\pi\, l_M)^{1/2}\ ]\,. \qquad (2.29)$$

В опытах на двухосное сжатие образцов пород получают соотношение, связывающее продольную и боковую нагрузку с прочностью породы. Для хрупких пород при небольшой боковой нагрузке это соотношение можно представить в виде линейной зависимости $\sigma_{S*} = \sigma_S + \beta_3 \sigma_3^0$, где σ_{S*} – прочность породы при боковой нагрузке; σ_S – прочность на одноосное сжатие; β_3 – коэффициент, определяемый в опытах (β_3 – const). По известным значениям γ_1 и β_3 можно определить другой параметр модели

$$\gamma_3 = \beta_3\, \gamma_1. \qquad (2.30)$$

Оценим критическую длину макротрещины $2l_*$ с помощью (2.26). Используем данные работы [97] для долерита и базальта. Имеем для долерита: K_{1c} = 1,8 МН/м$^{3/2}$, σ_S = 118 МПа, d = 0,3 мм, E = $5{\cdot}10^4$ МПа, ν = 0,18; для базальта: K_{1c} = 1,24 МН/м$^{3/2}$, σ_S = 108 МПа, d = 0,1 мм, E = $5{,}5{\cdot}10^4$ МПа, ν = 0,14.

По формуле (2.29) находим для долерита γ_1 ~ (0,22 – 0,31), для базальта γ_1 ~ (0,29 – 0,41). Критическая длина макротрещины при одноосном сжатии составляет: для долерита $2l_*$ ~ (21 – 30) см, для базальта $2l_*$ ~ (6 – 8) см.

Проводя подобную оценку для других горных пород, нетрудно заключить: чем крупнее зернистость породы, тем больше критическая длина макротрещины. Для одних горных пород эта величина составляет несколько сантиметров, для других – десятки сантиметров.

Условия равновесия макротрещины (2.4) можно записать в ином виде. Учитывая (2.25), (2.27), (2.28) и (2.30), имеем

$$\sigma_S = f(l/l_м)\,(\sigma_1^0 - \beta_3\,\sigma_3^0). \qquad (2.31)$$

Функция $f(l/l_м)$ при малых l растет с длиной трещины как $l^{1/2}$, а при больших l изменяется очень слабо.

Соотношение (2.31) можно толковать как некоторое обобщенное критериальное соотношение для разрушающейся зернистой породы, полученное из теории трещин. Это соотношение можно сопоставить с феноменологическими критериями п.2.1. Такое сопоставление позволяет сделать следующее заключение: если зернистая порода разрушается хрупко и отрывом, то применение феноменологических критериев п,2.1 позволяет определить лишь начало разрушения в ненарушенной горной породе. Количественная оценка параметров разрушения реального массива (горной породы с природными трещинами) с помощью критериев п.2.1 проблематична, поскольку в этих критериях не учитывается длина трещин.

Зависимость критериального соотношения от длины трещины исчезает для протяженных трещин. Поэтому есть основание полагать, что состояние массива пород с длинными трещинами может быть описано соотношением, похожим по форме на феноменологический критерий разрушения

$$\sigma_{S*} = \sigma_1^0 + \beta_3\sigma_3^0, \qquad (2.32)$$

если σ_{S*} понимать как остаточную прочность

$$\sigma_{S*} = \sigma_S / f_0 \ .$$

Здесь $f_0 = \lim\limits_{l\to\infty} f(l/l_M)$ параметр, зависящий от микроструктуры породы, параметров деформационных свойств и компонент исходного поля напряжений.

2.6. Криволинейные макротрещины отрыва

2.6.1. *Методика расчета.* В рассмотренных выше моделях предполагалось, что макротрещины распространяются прямолинейно. Это предположение было обусловлено рядом условий. Например, предполагалось отсутствие в материале поверхности ослабленных связей, которая предопределяет направление развития макротрещины. Предполагалось также, что в силу хаотичности ориентации дефектов касательными усилиями на берегах макротрещины в макромасштабе можно пренебречь. Считалось также, что условия внешнего нагружения отвечают условиям симметрии.

Эти предположения часто имеют достаточное обоснование, поэтому использование их во многих случаях правомерно. Вместе с тем целесообразно рассмотреть ситуации, в которых какое-либо из предположений не выполняется и траектории развития макро-

трещин отличаются от прямолинейных. Такие ситуации связаны либо с нарушением симметрии в смещениях, либо симметрии нагружения относительно осевой линии трещины.

При нарушении симметрии в окрестности кончика макротрещины возникает сложное напряженное состояние, описываемое с помощью коэффициентов интенсивности напряжений K_1 и K_2 . Локальные растягивающие напряжения определяются формулой [124]

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{4(\pi r)^{1/2}} \operatorname{Re}\left[3(K_1 - i K_2)\, e^{\frac{i\theta}{2}} + (K_1 + 3 i K_2)\, e^{\frac{3 i \theta}{2}}\right], \qquad (2.33)$$

где r , θ - локальные полярные координаты с центром в кончике трещины, угол θ отсчитывается от направления осевой линии в кончике трещины (см.рис. 2.1).

Максимальное значение растягивающих напряжений σ_θ достигается по направлению, определяемому углом $\theta = \theta_M$. Угол θ_M находится из уравнения $\sigma'_\theta(\theta_M) = 0$. Решение этого уравнения, удовлетворяющее условию $\theta_M = 0$ при $K_1/K_2 = 0$, можно записать в виде

$$\theta_M = 2arctg\,[1-(1+8\,(K_2\,/\,K_{I1}\,)^2)^{1/2}\;\; K_1\,/\,(4\,K_2\,)]. \qquad (2.34)$$

Если трещина начнет расти в направлении, определяемом углом θ_M , то изменится первоначальное направление развития трещины и траектория трещины будет иметь излом.

Вообще говоря, резкий излом в траектории развития трещины имеет место тогда, когда скачкообразно изменяются условия симметрии. В случае непрерывного изменения этих условий поверхность трещины должна быть гладкой без изломов. При этом в любой момент роста трещины касательная плоскость к ее поверхности в любой точке контура будет представлять собой площадку, на которой величина локальных растягивающих напряжений максимальна, а касательные напряжения обращаются в нуль.

Методика построения гладких траекторий трещин отрыва подробно описана в работе [124]. Однако практика приближенных численных расчетов траекторий трещин показывает, что намного проще строить траекторию трещины с небольшими локальными изломами, пользуясь соотношением (2.34). Гладкую кривую можно построить по окончании расчетов при графической обработке результатов.

В рассмотренных ниже примерах будем использовать модель макротрещины для зернистой породы.

В этом случае на каждом шаге построения траектории макротрещины отрыва проводятся следующие операции [92,116].

1) Задаются главные компоненты внешней нагрузки "на бесконечности" σ_1^0, σ_3^0.

2) Задается геометрия тонкого разреза, моделирующего трещину: $\omega(t)$, где ω – угол наклона осевой линии разреза по отношению к направлению действия максимальной сжимающей нагрузки "на бесконечности" σ_1^0, t – текущая криволинейная координата длины.

3) Задается внутренняя нормальная $\sigma_n(t)$ и касательная $\tau_n(t)$ нагрузка на разрезе с помощью соотношений

$$\sigma_n = [\gamma_1 \sigma_1^0 - (\gamma_3 - 1) \sigma_3^0] \cos \omega(t),$$

$$\tau_n = [\gamma_1 \sigma_1^0 - (\gamma_3 - 1) \sigma_3^0] \sin \omega(t). \quad (2.35)$$

4) Решается задача теории упругости для криволинейного разреза и находятся коэффициенты интенсивности напряжений K_1 и K_2 вблизи его кончиков.

5) По соотношению (2.34) вычисляется угол θ_M отклонения направления развития трещины от осевой линии трещины в ее кончике.

6) Оценивается условие выполнения критерия развития трещины в направлении, определяемом углом θ_M:

$$K_1 |_{\theta=\theta_M} \geq K_{1c}. \quad (2.36)$$

7) Если последнее соотношение выполняется, то задается приращение длины разреза Δl в направлении, определяемом углом θ_M.

Вопрос о величине приращения длины разреза Δl при выполнении неравенства (2.36) является открытым. В этом случае все варианты задания величины Δl условны, сколь условен и сам квазистатический подход. На наш взгляд приращение длины разреза логично задавать исходя из чувствительности метода расчета: следует задавать минимально возможное приращение, при котором соответствующие изменения в напряженном состоянии уже не оцениваются как погрешность вычислений.

После осуществления операций (1)–(7) проводятся вычисления для нового шага в траектории развития трещины.

2.6.2. *Траектория макротрещины отрыва при наличии в геоматериале поверхности ослабленных связей.* Если макротрещина образуется вдоль поверхности ослабленных связей, то траектория трещины, очевидно, может не совпадать с направлением действия

наибольшей сжимающей нагрузки. Однако на границе этой поверхности траектория трещины может измениться.

Для исследования этого вопроса в условиях плоской деформации рассмотрим небольшую начальную макротрещину, которая образовалась вдоль небольшого плоского участка ослабленных связей в геоматериале. Плоскость ослабленных связей наклонена под углом ω к направлению действия наибольшей сжимающей нагрузки σ_1^0. Линейный размер участка ослабленных связей (начальный размер макротрещины) равен $2l_0$.

Схема, с помощью которой можно понять исходные условия в задаче расчета траектории макротрещины, показана на рис. 2.9. На рис. 2.9,а условно показаны трещинопорождающие дефекты (кружки с крестиками), микротрещины отрыва, вытянутые вдоль направления ослабленных связей (пунктирная линия), распирающие Q и касательные T^-, T^+ усилия, порождаемые дефектами.

На рисунке 2.9,б условно показана ситуация после объединения микротрещин отрыва в макротрещину. Действия касательных усилий от отдельных дефектов T^- и T^+ в макротрещине взаимно ослаблены и поэтому не рассматриваются. К берегам макротрещины приложены сосредоточенные силы Q, действующие под углом $\pi/2-\omega$ к поверхности берега.

Рисунок 2.9,в показывает разложение сосредоточенных сил Q на нормальные Q_n и касательные усилия Q_t на берегах макротрещины. Следовательно, касательные усилия в макротрещине появляются как следствие наклона трещины. Наконец, рисунок 2.9,г иллюстрирует переход от сосредоточенных усилий Q_n, Q_t, порождаемых дефектами, к равномерно распределенной нормальной σ_n^0 и касательной τ_n^0 нагрузкам.

Таким образом, исследуется состояние короткой макротрещины, наклоненной под углом ω к направлению действия главной сжимающей нагрузки σ_1^0. Трещина нагружена распределенной нагрузкой σ_n^0, τ_n^0, приложенной к ее берегам, на бесконечности действуют сжимающие напряжения.

Расчет возможной траектории развития трещины производится в статической постановке. При этом полагаем, что, во-первых, в начальный момент выполняется критерий развития трещины, во-вторых, дальнейшее развитие трещины происходит не по заданному изначально направлению, а под влиянием формирующегося в

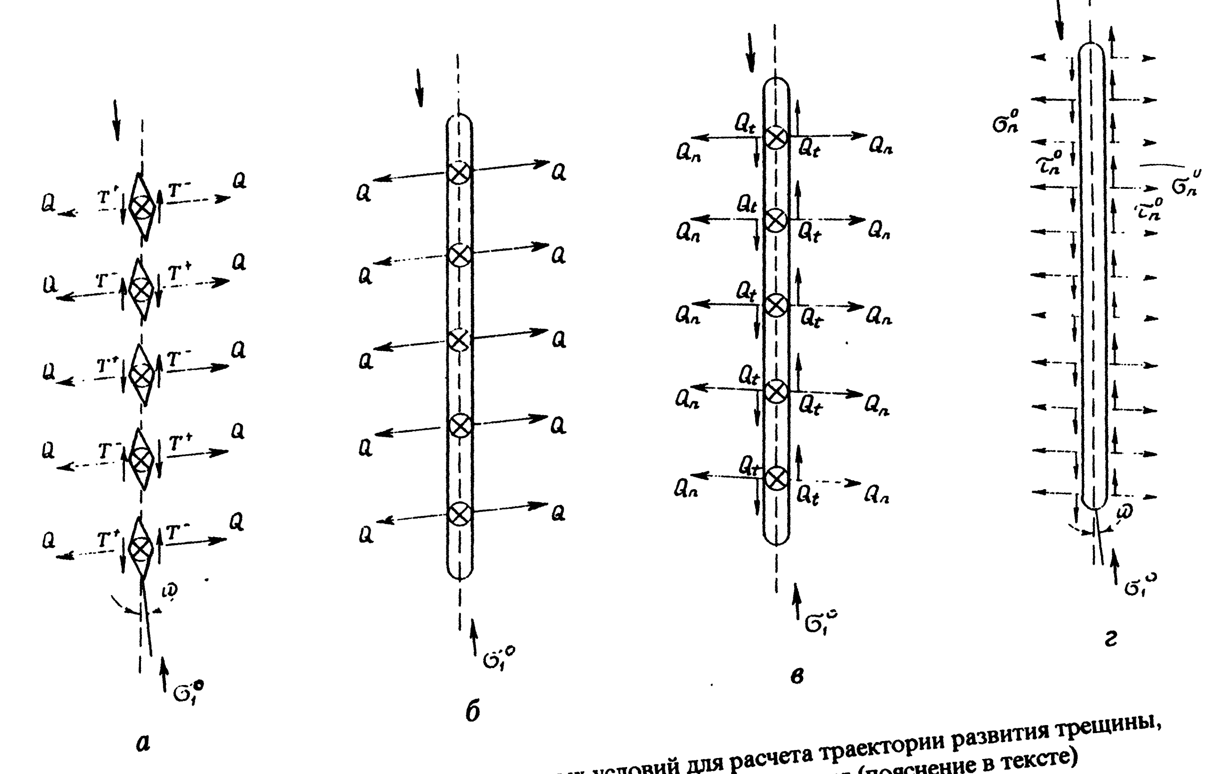


Рис. 2.9. Схема к определению исходных условий для расчета траектории развития трещины, ориентированной под углом к направлению наибольшего сжатия (пояснение в тексте)

процессе роста трещины напряженно-деформированного состояния.

Для расчета используем алгоритм, изложенный в п. 2.6.1. В качестве численного метода расчета напряженного состояния применен метод граничных элементов. Результаты модельных расчетов показаны на рисунках 2.10 и 2.11.

На рис. 2.10 в координатах $x_* = x/l_0$, $y_* = y/l_0$ (l_0 – начальная

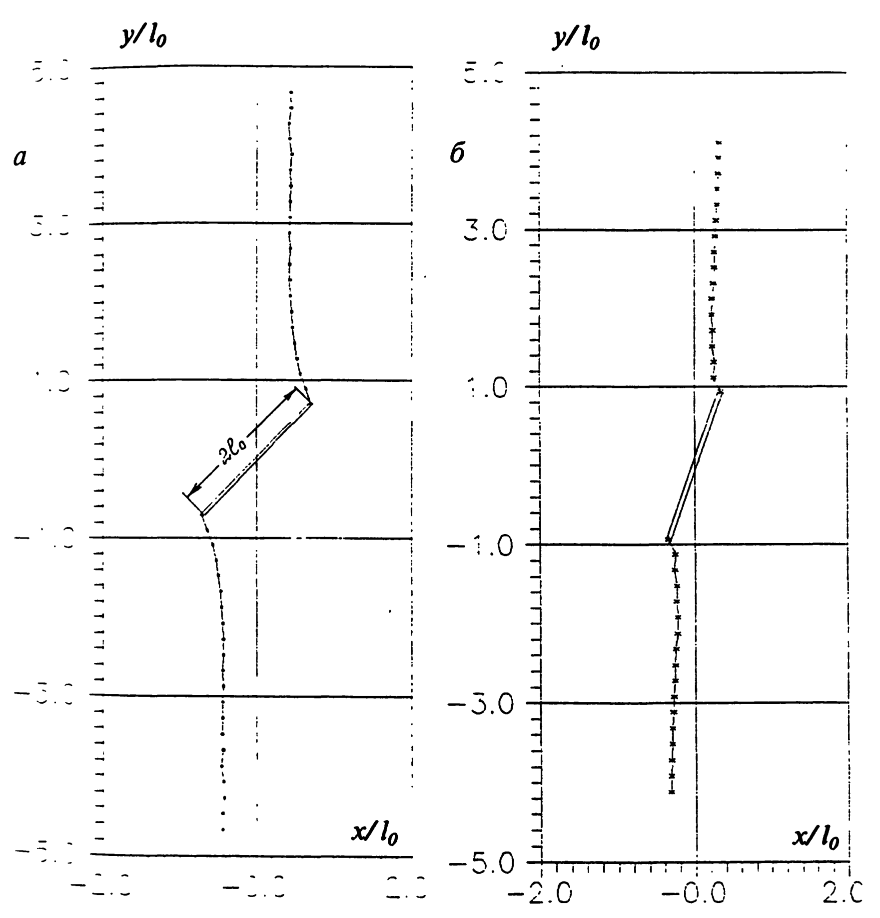


Рис. 2.10. Траектории развития макротрещины, наклоненной под углом 45° (а) и 20° (б) к наибольшей сжимающей нагрузке

полудлина трещины) показаны траектории развития трещин при различных углах наклона исходной трещины : $\omega = 45^\circ$ (рис. 2.10,а) и $\omega = 20^\circ$ (рис.2.10,б). Соотношение параметров внешней и внутренней нагрузки: $\sigma_3^0 / \sigma_1^0 = 0{,}5$; $\sigma_n^0 / \sigma_1^0 = 2$ (σ_n^0 – нормальная нагрузка на исходной трещине).

На рис. 2.11 для сравнения показаны траектории развития макротрещины от начальной трещины, ориентированной под углом $\omega = 45^\circ$ к направлению действия σ_1^0, при различных значениях параметров нагрузки: (1) – $\sigma_3^0 / \sigma_1^0 = 0{,}5$, $\sigma_n^0 / \sigma_1^0 = 2$; (2) – $\sigma_3^0 / \sigma_1^0 = 0$, $\sigma_n^0 / \sigma_1^0 = 2$; (3) – $\sigma_3^0 / \sigma_1^0 = 0$, $\sigma_n^0 / \sigma_1^0 = 0{,}5$ (наиболее представительный случай); (4) – $\sigma_3^0 / \sigma_1^0 = 0$, $\sigma_n^0 / \sigma_1^0 = 6$.

Во всех рассмотренных случаях траектория макротрещины имеет резкий излом в начальный момент. В дальнейшем ее траектория искривляется плавно. В конечном счете макротрещина ориентируется в направлении действия наибольшей сжимающей нагрузки σ_1^0 .

Заметим, что вычисленные траектории трещин подобны траектории трещины отрыва, растущей от наклонной сдвиговой трещины при одноосном сжатии. Последний случай исследовалдся в модельных лабораторных экспериментах [157], а также аналитически, например в [57].

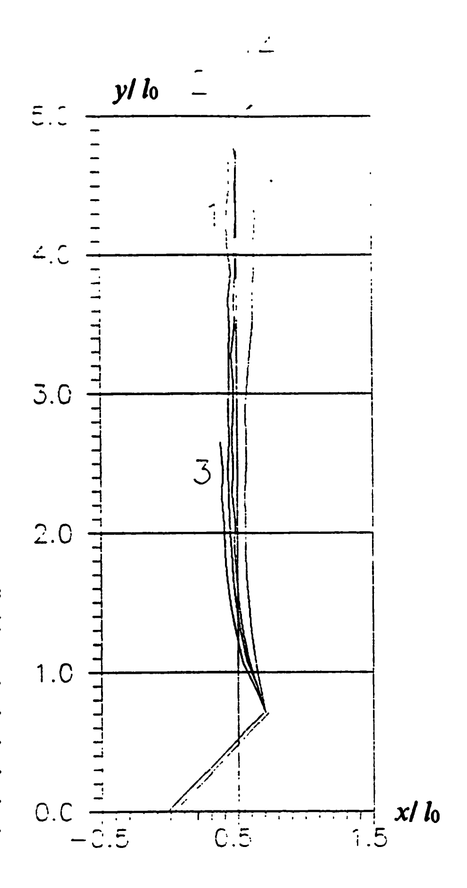


Рис. 2.11. Траектории развития макротрещин при различных параметрах нагрузки (пояснение в тексте)

Таким образом, несмотря на некоторое различие в условиях нагружения начальных трещин (в отношении касательных напряжений), траектории трещин отрыва в конечном счете ориентируются вдоль направления максимального сжатия. Это общий результат исследований в развитии изначально наклоненных трещин.

Принципиальное различие результатов наших исследований и исследований [57,157] состоит в следующем. В рассмотренных здесь случаях коэффициент интенсивности максимальных растягивающих напряжений растет с длиной трещины, следовательно трещина должна развиваться динамически. В [57,157] коэффициент интенсивности напряжений убывает с длиной трещины, поэтому трещина с ростом нагрузки развивается устойчиво.

2.6.3. *Траектория развития макротрещины при наличии небольшого участка с одинаково ориентированными дефектами.* Рассмотрим короткую макротрещину длины $2l_0$, ориентированную вдоль направления действия нагрузки σ_1^0. Будем полагать, что начальная макротрещина порождена дефектами, создающими в этой макротрещине помимо распирающих усилий σ_n^0 также касательные усилия τ_n^0. Выбор исходных условий для расчета траектории макротрещины поясняется рис. 2.12.

На рис. 2.12,а условно показаны дефекты и микротрещины отрыва. Все дефекты ориентированы одинаково, поэтому при объединении цепочки микротрещин в макротрещину (рис. 2.12,б), в последней помимо сосредоточенных нормальных усилий Q_n, действуют сдвиговые усилия Q_t. Рис. 2.12,в иллюстрирует переход от сосредоточенных усилий к распределенной нагрузке σ_n^0, τ_n^0.

Заданы следующие значения параметров нагрузки: $\sigma_3^0/\sigma_1^0 = 0$; $\sigma_n^0/\sigma_1^0 = 2$; $\tau_n^0/\sigma_n^0 = 1$ (σ_n^0, τ_n^0 – значения распределенной нормальной и сдвиговой нагрузки в начальной трещине).

Кроме того полагаем, что в начальный момент критерий роста трещины выполняется, а последующее развитие трещины происходит в области с уже хаотически ориентированными дефектами. Для расчета траектории используем алгоритм, описанный выше.

Результаты расчета траектории показаны на рис. 2.13. Сначала траектория трещины резко отклоняется от вертикали, т.е. от направления максимального сжатия, а затем, плавно искривляясь, приближается к вертикальной линии.

Примеры, рассмотренные в п. 2.6.2 и 2.6.3, дают основание для важного вывода: на участке неоднородности или анизотропности в

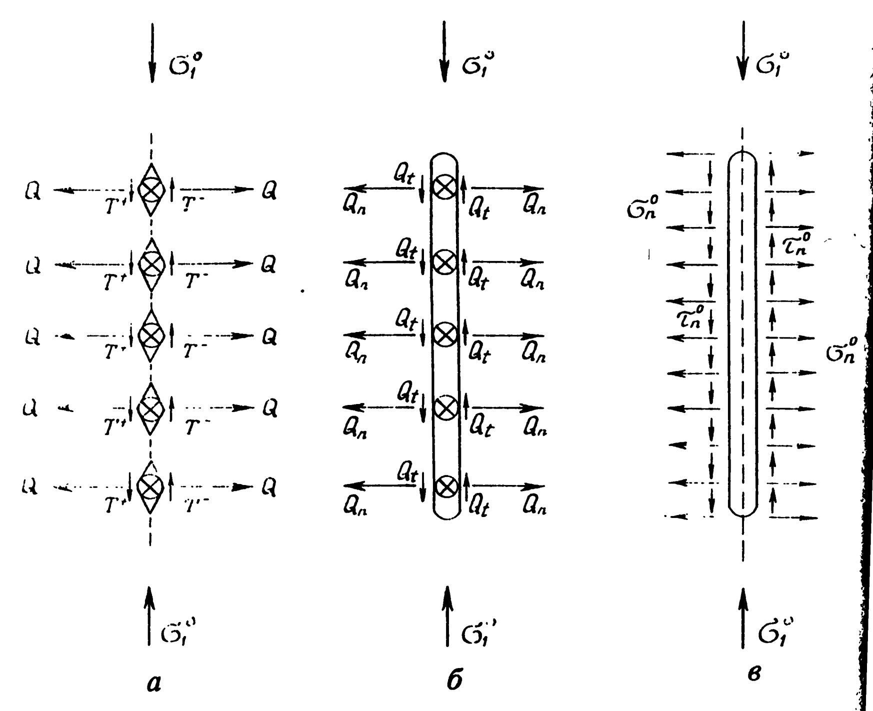


Рис. 2.12. Схема к определение исходных условий для расчета траектории макротрещины, в которой на вертикальном участке действуют сдвиговые усилия (пояснение в тексте)

горной породе траектории макротрещин могут не следовать направлению максимального сжатия. Однако по мере прохождения этих участков макротрещины искривляются и растут в направлении максимального сжатия. Можно сказать, что направление максимального сжатия является направлением устойчивого развития макротрещин отрыва.

Здесь следует сделать оговорку. Это заключение справедливо, если боковое сжимающее напряжение σ_3^0 мало ($\sigma_3^0 << \sigma_1^0$). В этом случае длина микротрещин отрыва от удаленных друг от друга дефектов значительно превышает размер дефектов. При объединении микротрещин в макротрещину направление развития макротрещины определяется только интегральными условиями на ее берегах и исходным напряженным состоянием. Влияние дефектов и микротрещин, не входящих в макротрещину, пренебрежимо мало.

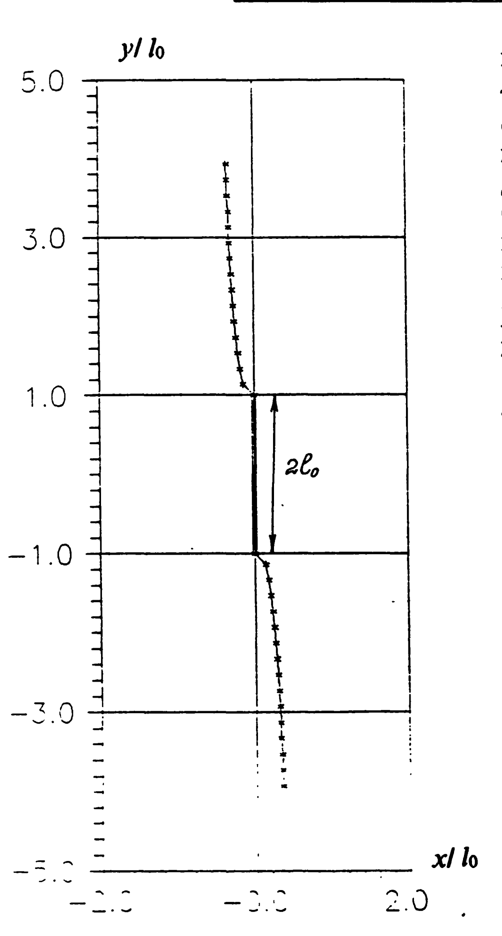


Рис. 2.13. Траектория развития макротрещины отрыва, на вертикальном участке которой действуют сдвиговые усилия

Если боковая сжимающая нагрузка σ_3^0 значительна, то микротрещины отрыва прорастут лишь на небольшую величину. Дальнейшее их развитие будет заторможено. Подготовка макроразрушения в этом случае будет происходить не столько за счет роста имеющихся микротрещин отрыва, сколько за счет увеличения их числа, т.е. за счет появления новых микротрещин. В результате в геоматериале сформируется область наведенной микротрещиноватости, в которой микротрещины отрыва влияют друг на друга. Как показывают моделирование и лабораторные опыты [31,44, 67,101,145], макроразрыв в этом случае будет иметь характер сдвига.

2.6.4 *Развитие макротрещины в горной породе вблизи свободной поверхности* [92]. С помощью алгоритма, изложенного в п. 2.6, построены траектории развития трещин отрыва вблизи свободной плоской поверхности. Расчеты приведены с целью исследования развития трещин отрыва вблизи обнажений пород в горных выработках.

Схема к расчетной задаче показана на рис. 2.14. В условиях плоской деформации рассматривается трещина в упругой среде, которая нагружена на бесконечности сжимающими напряжениями, действующими параллельно свободной поверхности. Начальная

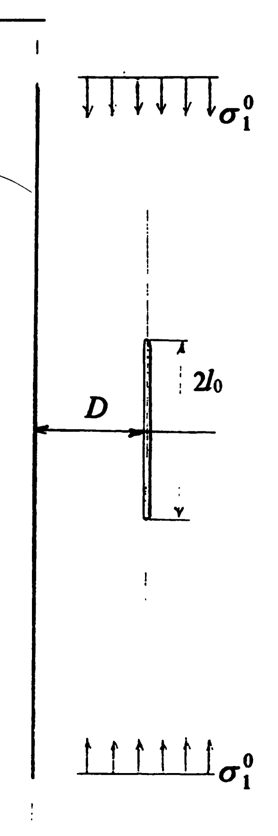


Рис. 2.14. Схема к задаче о развитии трещины отрыва вблизи свободной поверхности

макротрещина отрыва параллельна свободной поверхности.

Считая, что условие роста начальной макротрещины выполняется, с помощью алгоритма п.2.6.1. определяются направление приращения длины трещины и изменение коэффициентов K_1 и K_2.

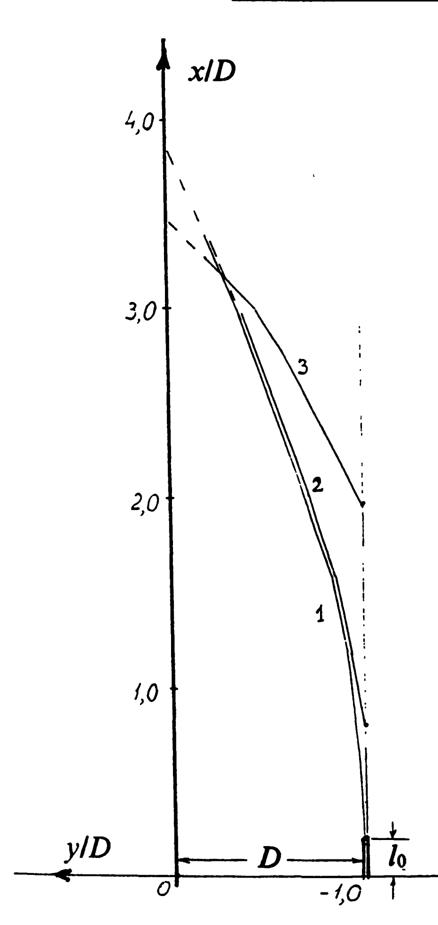
Если трещина расположена далеко от свободной поверхности, то, очевидно, трещина должна развиваться прямолинейно. Если трещина расположена вблизи свободной поверхности, то в плоскости, в которой расположена трещина, возле концов трещины появляются касательные напряжения. В этом случае траектория растущей трещины должна искривиться.

Траектории развития трещин рассчитаны при различных начальных условиях. В расчетах варьировались начальная длина трещины и начальное расстояние трещины от поверхности, а также оценивалось влияние небольшой сжимающей нагрузки, действующей нормально к поверхности.

Анализируя траектории трещин отрыва вблизи поверхност целесообразно выделить два случая: развитие коротких (в смысл определения п. 2.5.1) и длинных макротрещин. На рис. 2.15 показа ны траектории развития коротких макротрещин при различны соотношениях начальной длины трещины и расстояния трещин до свободной поверхности $2l_0/D$: *1* – 0,4; *2* – 0,8; *3* – 4,0.Чем больш отношение $2l_0/D$, тем больше начальный угол излома траектори трещины. Если это отношение меньше примерно 0,5, то траектори трещины является гладкой на всем протяжении.

Как видно из рис. 2.16, коэффициент интенсивности макси мальных растягивающих напряжений для коротких криволиней ных трещин растет с длиной трещины существенно быстрее (кри вые *1*, *2*, *3*), чем в случае прямолинейной трещины (*4*). Это косвенно

Рис. 2.15. Траектории развития коротких макротрещин вблизи свободной поверхности (пояснение в тексте)



может свидетельствовать об интенсивности динамического процесса развития криволинейной трещины.

Если начальная длина макротрещины $2l_0$ много меньше расстояния до поверхности D, то макротрещина отрыва развивается, не искривляясь, пока ее длина и расстояние до поверхности находятся, примерно, в соотношении $2l / D \leq 0{,}4$. Если это соотношение с ростом трещины перестанет выполняться, то траектория трещины может измениться в зависимости от того, является ли она к этому моменту короткой или длинной.

Если к этому моменту макротрещина является короткой или слегка превышает критическую длину макротрещины $2l_*$, то при дальнейшем росте трещины ее траектория будет постепенно искривляться и в конечном счете трещина обеими концами выйдет на поверхность (рис. 2.15). Траектории коротких искривленных макротрещин приблизительно подобны при различных начальных условиях развития. Отношение начального удаления трещины от поверхности к расстоянию между концами трещины на поверхности составляет 0,1 – 0,2.

Если же макротрещина является длинной, причем длина концевого участка $l - b_*$, где проявляется распирающее действие дефектов, меньше примерно в пять раз расстояния трещины до поверхности, то такая макротрещина продолжает и далее расти параллельно поверхности, оставаясь прямолинейной.

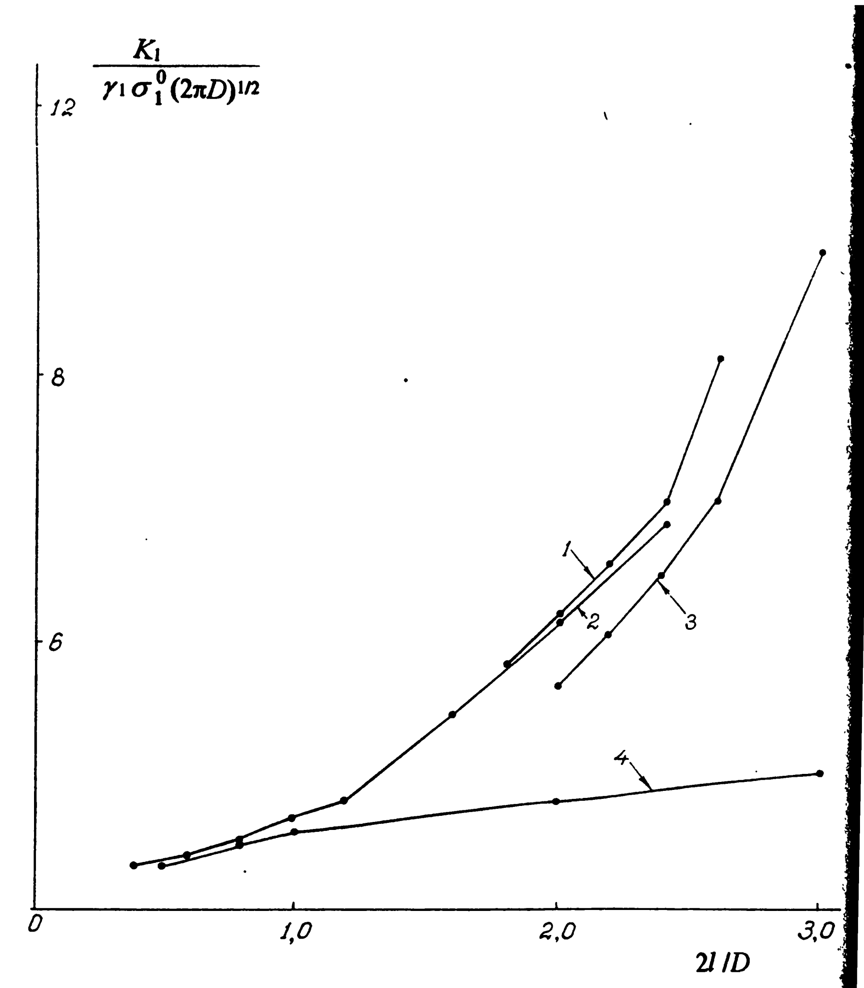


Рис. 2.16. Изменение коэффициента интенсивности напряжений от длины криволинейной трещины (пояснение в тексте)

Из соотношений п.2.5 можно вывести неравенства $(l-b_*) < l_*$, $(l-b_*) > 0{,}64 l_*$. Принимая их во внимание, заключаем, что для роста трещины вдоль поверхности должно выполняться соотношение

$$D > (3 \div 5)\, l_* \quad . \tag{2.37}$$

Отсюда с учетом (2.26) и (2.29) можно получить соотношение для оценки величины D

$$D \sim (3 \div 5)\, d^{3/2} E / K_{Ic}\,. \qquad (2.38)$$

К аналогичным результатам в отношении развития макротрещин можно прийти и при задании на поверхности небольшой нормальной сжимающей нагрузки (естественно такой, при которой выполняются условия роста макротрещин отрыва). Соответствующие траектории трещин на рис. 2.15 не показаны ввиду того, что на этом рисунке они фактически сливаются с траекториями, построенными при отсутствии нагрузки на поверхности.

В заключение отметим, что искривление макротрещин при несоблюдении условий симметрии в задаче является очевидным, ожидаемым результатом. Весьма неожиданным оказалось то, что при нарушении симметрии макротрещины могут также развиваться прямолинейно. Этот результат объясняется проявлением масштабного эффекта в отрывном разрушении.

2.7. Масштабный эффект в развитии трещины отрыва

По определению под масштабным эффектом в механике понимается изменение наблюдаемого физического поведения геометрически подобных тел и конструкций в зависимости от их размера. При этом, как правило, геометрическое подобие рассматривается макроскопически. Такие размеры, как диаметр зерна, расстояние между частицами, размеры других микропараметров, в расчет не принимаются [37].

Проведенные в п. 2.5 и 2.6 исследования позволяют сделать вывод о наличии масштабного эффекта в развитии макротрещины, описываемой микротрещинной моделью. Отрывное разрушение зернистой породы при сжатии в масштабе образца и в масштабе горной выработки может различаться, причем масштабный эффект возможен по крайней мере в трех проявлениях.

1. С увеличением длины макротрещины изменяется условие ее предельного равновесия. Развитие короткой макротрещины определяется распирающим действием дефектов по всей длине трещины. Предельно равновесное состояние короткой трещины неустойчиво. Следовательно, если с ростом нагрузки достигается предельно равновесное состояние, то короткая макротрещина должна начать развиваться динамически.

Развитие длинной трещины происходит за счет распирающего действия дефектов в концевых частях трещины. Протяженность участка, где проявляется распирание в длинной трещине, с увеличением длины трещины меняется довольно слабо. Поэтому можно сказать, что концы трещины продвигаются как бы в автономном режиме.

Изменение условия взаимодействия берегов в длинной трещине не влияет на условие роста трещины. Предельно равновесное состояние длинной трещины также неустойчиво. Поэтому когда короткая трещина, динамически развиваясь, становится длинной, она должна сохранить динамику развития.

Однако для очень длинной трещины, в которой длина средней части (см. рис. 2.7,а), намного превышает длину активных концов, предельно равновесное состояние макротрещины близко к состоянию безразличного равновесия. Динамический режим развития этой трещины при определенных условиях (например, при небольшом снижении нагрузки) может смениться на квазистатический. Во многих горных породах это должно иметь место тогда, когда длина трещины превысит несколько десятков сантиметров.

2. С ростом длины макротрещины тенденция ее влияния принципиально изменяется. Для короткой макротрещины область влияния растет пропорционально длине трещины, для длинной – уменьшается обратно пропорционально длине. Первое утверждение очевидно для трещин с постоянной однородной нагрузкой на берегах и для открытых трещин. Второе утверждение следует из решения задачи (2.24) при $b_*/l \to 1$. Например, на оси ОУ напряжения σ_x и σ_y в задаче о длинной трещине представляются формулами

$$\sigma_x(0,y)=\sigma_1^0+\left[1-\frac{\left(y^2+b_*^2\right)^{1/2}}{(y^2+l^2)^{1/2}}-\frac{y^2\left(l^2-b_*^2\right)}{(y^2+b_*^2)^{1/2}(y^2+l^2)^{3/2}}\right]\times \qquad (2.39)$$
$$\times(\gamma_1\sigma_1^0-\gamma_3\sigma_3^0)$$

$$\sigma_y(0,y)=\sigma_3^0+\left[1-\frac{\left(y^2+b_*^2\right)^{1/2}}{(y^2+l^2)^{1/2}}+\frac{y^2\left(l^2-b_*^2\right)}{(y^2+b_*^2)^{1/2}(y^2+l^2)^{3/2}}\right]\times$$
$$\times(\gamma_1\sigma_1^0-\gamma_3\sigma_3^0)$$

Из этих формул следует, что для длинной трещины вблизи ее берегов ($y \ll l$) возмущения по напряжениям $\Delta\sigma_x=\sigma_x-\sigma_1^0$, $\Delta\sigma_y=\sigma_y-\sigma_3^0$ с точностью до членов второго порядка малости $(l_*/l)^2$ могут быть записаны в виде

$$\Delta\sigma_x=\Delta\sigma_y\approx(l_*/\pi l)(\gamma_1\sigma_1^0-\gamma_3\sigma_3^0)\ . \qquad (2.40)$$

При $l \to \infty$ вблизи длинной макротрещины напряженное состояние геоматериала мало отличается от начального состояния до образования макротрещины. Отсюда следует важный вывод – вблизи длинной макротрещины отрыва возможно развитие другой макротрещины отрыва. Как и первая трещина, она должна быть ориентирована вдоль направления максимального сжатия и может иметь большую длину. Повторяя это рассуждение для других трещин, можно объяснить возникновение структуры протяженных параллельных закрытых трещин отрыва вдоль направления наибольшего сжатия.

Для коротких трещин, в которых распирающее действие дефектов проявляется по всей длине трещины (а также для открытых трещин), может сформироваться другая структура трещиноватости. Для коротких и открытых трещин с ростом длины увеличивается область влияния. Одна трещина может остановить другую, растущую параллельно первой. Это происходит тогда, когда вторая трещина попадет в область влияния первой. Такое взаимодействие трещин ведет к образованию эшелонной структуры трещин [31].

Таким образом, прямолинейные макротрещины в зависимости от их масштаба могут образовывать две структуры отрывного макроразрушения в виде параллельных протяженных закрытых трещин и эшелона коротких трещин.

3. Масштабный фактор влияет на траектории развития макротрещин отрыва вблизи обнажения пород. Трещина отрыва, зарождающаяся у поверхности обнажения и первоначально ориентированная вдоль поверхности, испытывает влияние этой поверхности и постепенно искривляется. В итоге она одним или двумя концами выходит на поверхность. Если трещина превышает некоторую критическую длину, не испытывая при этом влияния поверхности, то в последующем своем развитии она должна развиваться вдоль поверхности, не выходя на нее, даже если ее длина в конечном счете будет намного превышать расстояние до поверхности.

Масштабный эффект в разрушении – один из самых важных выводов, который следует из рассмотренной выше теории развития трещин отрыва В хрупкой зернистой горной породе разрушение отрывом при сжатии в масштабе образца и в масштабе выработки может различаться как по характеру развития разрушения (динамика или статика), так и по образующейся структуре трещиноватости.

Вместе с тем следует отметить, что наблюдение на практике проявлений масштабного эффекта в массиве горной породы яв-

ляется основанием для описания развития трещин отрыва в этой породе с помощью микротрещинной модели.

2.8. Основные выводы из теории

Разработанные математические модели макротрещин и сделанные на их основе выводы являются теоретическим фундаментом для изучения отрывного разрушения пород при сжатии. С помощью разработанных моделей можно не только анализировать натурные и лабораторные данные о развитии макротрещин, проводить количественные оценки разрушения в целях практики, но и создавать прогнозные аналитические модели некоторых динамических проявлений горного давления.

Проведенные теоретические исследования позволяют ответить на некоторые принципиальные вопросы хрупкого разрушения пород. Прежде всего это относится к самому понятию отрывного разрушения пород, а именно к отрывному разрушению при действии растягивающих и при действии сжимающих напряжений. Отрывное разрушение при действии растягивающих напряжений описывается классической моделью Гриффитса-Ирвина, в которой условие предельного равновесия трещины, нормально нагруженной на бесконечности растягивающими напряжениями ($\sigma_1^0 < 0$), записывается в виде уравнения

$$K_{1c} = (\pi l)^{1/2} \, |\sigma_1^0| , \qquad (2.41)$$

где l – полудлина трещины.

Поскольку (2.41) справедливо для трещин произвольной длины (микротрещин и макротрещин), можно заключить, что в рассматриваемом случае микроструктура породы имеет значение для начала развития трещины, но не является определяющим фактором для самого процесса развития трещины.

В то же время главная особенность отрывного разрушения при действии сжимающих напряжений заключается в том, что микроструктура породы определяет состояние трещины не только в начальный момент, но и в течение всего процесса ее роста. Микроструктура учитывается в постановке задач, микроструктурные параметры входят в основные соотношения, описывающие поведение макротрещин. Условие предельного равновесия трещины описывается различными уравнениями в зависимости от типа микроструктуры породы, длины трещины и взаимодействия ее берегов. С точки зрения описания и прогноза отрыв при растяжении и отрыв при сжатии можно трактовать как два различных вида разрушения.

Из анализа условий, определяющих начало отрывного разрушения при действии растягивающих и при действии сжимающих напряжений, становится понятной одна из причин различия опытных данных по прочности пород на отрыв при сжатии и при растяжении, которое отмечалось в работах Л.И. Барона (см. п.1.1). Действительно уравнение (2.41), справедливое при действии растягивающих напряжений, отличается от аналогичного уравнения, описывающего трещину отрыва при действии сжимающих напряжений. Например, условие (2.41) отличается от условия разрушения при сжатии, которое можно получить из (2.4) и (2.25) при $\sigma_3^0 = 0$, не только знаком напряжений σ_1^0, но и множителем γ_1, зависящего от микроструктуры породы. Таким образом, из теории следует, что значения прочности на отрыв при растяжении σ_t составляет некоторую долю прочности при сжатии σ_S. Величина этой доли зависит от микроструктуры породы. (Отметим, что из сопоставления σ_t и σ_S можно количественно оценить γ_1).

Проведенные исследования позволяют лучше понять особенности применения критериев разрушения в виде линейной комбинации главных напряжений. Упоминавшиеся в п.2.1 критерии могут описывать только момент начала отрывного разрушения, поскольку в эти критерии явно не входит параметр дефектов, провоцирующих и поддерживающих развитие трещин. В некоторых грубых оценках такие критерии применимы. Однако в детальных качественных и количественных оценках, эти критерии могут привести к ошибочным результатам.

Критерии разрушения, описывающие поведение трещин и учитывающие размеры последних, являются более работоспособными. Полученные выше критерии (2.13), (2.17), (2.27) применимы для анализа отрывного разрушения сжатой крупнопористой породы и зернистой породы на различных стадиях развития разрушения.

Особое значение эти критерии приобретают для оценки той стадии разрушения породы, которая характерна образованием протяженных трещин отрыва. И поровая, и микротрещинная модели указывают на реальность образования в массиве областей отрывного разрушения, в которых протяженные закрытые макротрещины ориентированы в одном направлении и располагаются близко одна к одной. Такие скрытые области отрывного разрушения могут неожиданно проявляться при изменении состояния массива.

В настоящее время отсутствуют натурные данные о геомеханическом состоянии скрытых областей отрывного разрушения, и

оценка напряженного состояния этих областей может быть осуществлена лишь теоретически. В этой связи критериальные соотношения для протяженных трещин (2.21) и (2.31) являются полезными, поскольку позволяют получить некоторое представление о соотношении компонент главных напряжений в области отрывного разрушения.

Исходя из сопоставления расчетных и натурных данных можно заключить, что в скальных породах микротрещинная модель лучше чем поровая описывает особенности развития трещин отрыва. Это связано не только с особенностями микроструктуры породы, т.е. трещинопорождающими дефектами, но и с особенностями напряженного состояния массива. Поровая модель отрывного макроразрушения применима в том случае, когда наименьшее главное напряжение составляет примерно один процент от наибольшего сжимающего напряжения. Однако поровая модель может найти применение для описания разрушения пород, насыщенных газом или жидкостью (см. например, гл. 6).

Микротрещинная модель разрушения может быть использована для описания крупномасштабного разрыва в земной коре. Возможную ситуацию иллюстрирует рис. 2.17 [32,108]. На рисунке показана схема формирования зигзагообразного магистрального разрыва, имеющего звенья сдвига и отрыва. Подобная схема разрушения рассматривалась также в других работах.

Целесообразно учесть в подобных схемах развития магистрального разрыва следующее обстоятельство. Если берега сдвиговых трещин выйдут из зацепления, то пропадет эффект распирания и изменятся условия для развития макроразрыва. Следовательно, при распространении магистрального разрыва в земной коре возможны явления, связанные с масштабным эффектом.

В моделях зигзагообразных трещин, также как и в микротрещинной модели, сдвиговые трещины одного масштабного уровня, порождают развитие отрывных трещин того же масштабного уровня, а в результате образуется сдвиго-отрывная структура разрушения более высокого масштабного уровня. Сообразуясь с современными представлениями о рангах структур разрушения (см. например, [31,32,108]), можно сказать, что микротрещинная модель представляет собой одну из детально разработанных моделей описания перехода разрушения ранга i к структуре более высокого ранга $i+1$. В частности, эта модель работает при переходе разрушения с масштаба образца на масштаб горной выработки.

Вывод о том, что процессы разрушения в масштабе образца и в масштабе выработок могут различаться, не является, конечно, новым. Однако здесь он приобрел более определенную формулировку и количественную оценку. В этом отношении важное значе-

ние имеют формулы (2.25) и (2.27), а также заключение о неустойчивости предельного равновесия коротких макротрещин и о безразличном равновесии протяженных макротрещин.

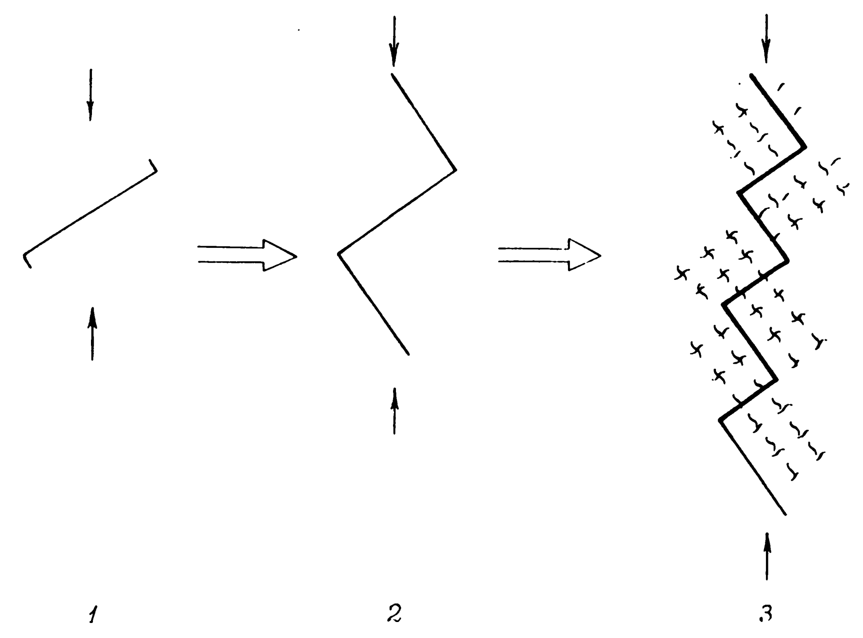


Рис.2.17. Стадии формирования магистрального разрыва [32,108]

Неустойчивость развития коротких макротрещин в зернистой породе может, в частности, объяснить некоторые особенности поведения породы при запредельном деформировании. Известно, что образец хрупкой породы в отсутствие видимых трещин деформируется упруго. Если при нагружении образца в условиях, близких к одноосному сжатию, достигнута прочность породы, то в нем должна зародиться по крайней мере одна макротрещина отрыва. Появление макротрещины изменит характер равновесного деформирования. Из соотношений (2.4), (2.25) следует, что при росте короткой макротрещины равновесное состояние образца может поддерживаться только в том случае, если напряжения сжатия уменьшаются.

Уменьшение напряжений с целью сохранения равновесного состояния и является главной особенностью запредельного деформирования образца при испытании его на жестком прессе. Эта осо-

бенность определяет появление ниспадающей ветви у кривой зависимости "нагрузка–деформация".

Для упругого образца уменьшение напряжений должно вызвать уменьшение деформаций. Поэтому наклон ниспадающей ветви запредельного деформирования образца хрупкой однородной породы, в котором развиваются одна–две вертикальные макротрещины, должен быть положительным. В самом деле, критическое условие равновесия трещины описывается уравнением

$$K_{1c} = (\pi l)^{1/2} \gamma_1 \sigma_1^0 .$$

Следовательно, чтобы имел место квазистатический рост трещины нагрузка σ_1^0 с длиной трещины $2l$ должна уменьшаться по закону $\sigma_1^0 = K_{1c} / [(\pi l)^{1/2} \gamma_1]$. Но уменьшение σ_1^0 в упругом материале вызывает и уменьшение осевой деформации ε_1, так как $\varepsilon_1 = \sigma_1^0 / E$. Таким образом можно заключить, что положительный наклон кривой запредельного деформирования свидетельствует о сохранении образцом упругости при развитии макротрещины.

Наличие положительного наклона у кривой запредельного деформирования подтверждается на практике при испытании образцов на прессах с сервоуправлением [184].

Макротрещины в образцах пород с менее однородной структурой на некоторых участках могут быть ориентированы не строго вдоль направления максимального сжатия. Поэтому в образцах пород второго типа в результате сдвига на наклоненных участках трещин уменьшение напряжений сжатия при запредельном деформировании сопровождается ростом деформаций сжатия (рис. 1.5).

Наличие горизонтального участка на графике запредельной зависимости "нагрузка–деформация" свидетельствует о потери связанности образца. Согласно [111] появление этого участка вызвано образованием трещины, рассекающей образец, и трением ее берегов.

При большом масштабе области запредельного деформирования, что характерно для условий массива горных пород, главную роль должны играть протяженные трещины, существенно превосходящие по длине размер обычного образца породы. Поскольку протяженные макротрещины ведут себя иначе, чем короткие, то и поведение крупномасштабной области запредельного деформирования должно отличаться от запредельного деформирования образца.

С ростом длины макротрещин изменяется характер их неустойчивости. Для протяженных макротрещин существует порого-

вый уровень нагрузки, ниже которого возможно устойчивое состояние трещин вне зависимости от их длины. Это дает основание заключить: кривая зависимости "нагрузка–деформация" для крупномасштабной области запредельного деформирования должна выполаживаться с уменьшением нагрузки и ростом деформаций; при определенном понижении напряжений область запредельного деформирования массива с протяженными трещинами отрыва должна перейти в устойчивое состояние.

Следовательно, кривая зависимости "нагрузка–деформация" для области запредельного деформирования массива в масштабе выработки должна содержать два участка: ниспадающую ветвь с пологим наклоном (более пологим, чем имеет соответствующая кривая, полученная при нагружении образца той же породы) и горизонтальный участок, который отражает качественное изменение равновесного состояния протяженных трещин. На горизонтальном участке кривой запредельного деформирования массив (в отличие от образца) может не терять свою связанность.

Если разрушение породы описывается поровой моделью, то деформирование, связанное с развитием в массиве макротрещин отрыва, не должно иметь ниспадающую ветвь на графике "нагрузка–деформация". В этом случае соотношения между напряжениями и деформациями в представительном объеме массива могут быть похожи на соотношения пластичности.

В заключение отметим, что разработанные модели хрупкого разрушения скальных пород могут быть обобщены в отношении участия в разрушении таких факторов как газ и вода. Этому вопросу будут посвящены некоторые из последующих глав.

Глава 3.
ТРЕЩИНЫ ОТРЫВА В ГАЗОНОСНЫХ ПОРОДАХ

3.1. Математические модели макротрещин при учете свободного газа

При разработке месторождений твердых полезных ископаемых часто встречаются горные породы, насыщенные газом (преимущественно метаном или углекислотой). К ним относятся многие песчаники, соли, каменный уголь. Газ может находиться в породе как в свободном (в трещинах и порах), так и в сорбированном состоянии.

При изменении исходного напряженного состояния массива газоносной породы, например при увеличении выработанного пространства, иногда начинается самопроизвольное разрушение породы, в котором активную роль играет газ. Расширяющийся свободный газ приводит в движение разрушенную породу и отбрасывает ее в выработанное пространство (внезапный выброс). Экспериментальные данные в отношении разрушения газоносной породы были приведены в п.1.3. Здесь рассмотрим математические модели развития трещин в породе с участием газа.

Математические модели разрушения газоносных пород в связи с выбросами породы (угля) и газа разрабатывались многими исследователями (см. например, [53,54,63,64,99,121–123]). Разрушение газоносных пород обычно рассматривается как развитие трещин отрыва в пористом материале вследствие распирающего действия свободного газа, содержащегося в порах. Однако, развитие трещин отрыва, как показано выше, может быть обусловлено и другим фактором – микронеоднородностью породы. Этот фактор не учитывался, поэтому ниже в моделях макротрещин отрыва в газоносных породах помимо действия свободного газа учитывается распирающее действие дефектов в виде пор и микротрещин.

Газоносные породы имеют разную структуру. Они могут представлять собой как крупнопористый материал с хорошо видимыми порами, так и микротрещиноватый материал, поры в котором практически незаметны. Так выбросоопасный каменный уголь часто обладает высокой микротрещиноватостью, которая выражается в наличии многочисленных, частично закрытых и слабо залеченных, разноориентированных экзогенных микротрещин [47,120,131]. Этот уголь напоминает спресованный брикет, состоящий из частиц диаметром приблизительно 0,5 мм, промежутки между которыми заполнены более тонко перетертыми частицами. Средняя величина просвета в этом случае составляет 0,004 мм. Свободный газ находится, главным образом, в микротрещинном про-

странстве, которое считается замкнутым до начала техногенного влияния.

Наличие разноориентированных микротрещин может способствовать развитию отрывного разрушения породы в условиях, близких к одноосному сжатию. С ростом внешней нагрузки активизируются природные микротрещины и порождают микротрещины отрыва, как было описано в гл.2. Свободный газ, находящийся в природной микротрещине, является дополнительным фактором, способствующим росту отрывных микротрещин. При росте нагрузки микротрещины отрыва прорастают и, сливаясь, образуют макротрещину вдоль направления действия σ_1^0.

По мере раскрытия микротрещин и развития макротрещины отрыва давление свободного газа падает. В тех материалах, где имеется сорбированный газ, уменьшение давления свободного газа при росте трещины может вызвать десорбцию и увеличить количество свободного газа в трещине. В п. 3.2–3.4 эти материалы не рассматриваются. Считается, что изменение давление газа p при изменении объема V описывается законом политропы для идеального газа (n показатель политропы)

$$p\,V^n = const\,. \qquad (3.1)$$

Рассмотрим далее две модели образования макротрещин в газоносных материалах: поровую и микротрещинную.

3.2. Поровая модель с учетом свободного газа

Поровая модель может быть применена для анализа отрывного разрушения в газоносном материале, содержащем крупные изолированные поры. Модель, изложенную в п.2.4, рассмотрим здесь с учетом действия свободного газа.

Сначала исследуем предельное равновесие макротрещины при условии, что начальное давление в порах p_0 превышает боковое поджатие σ_3^0, т.е. $p_0 > \sigma_3^0$. Макротрещина в этом случае является открытой (рис. 2.5,а). В обозначениях п. 2.4 граничные условия на трещине и условия на бесконечности имеют вид

$$\sigma_y(x,0)= P\delta(\,|\,x\,|-c)+p\,, \qquad \tau_{xy}(x,0) = 0, \qquad |\,x\,|\le l\ ; \qquad (3.2)$$

$$\sigma_x(x,y)= \sigma_1^0\,, \qquad \sigma_x(x,y) = \sigma_3^0\,, \qquad \tau_{xy}(x,0) = 0,$$

$$(x^2 + y^2 \to \infty)\,, \qquad (3.3)$$

где p – давление газа в макротрещине.

Условие предельного равновесия открытой макротрещины, содержащей свободный газ, можно представить в виде уравнения

$$K_{1c} = (\pi d_*)^{1/2} \sigma_1^0 + (\pi l)^{1/2} (p - \sigma_3^0) , \qquad (3.4)$$

которое с учетом (2.18) соответствует уравнению (2.13).

Без учета пор объем двумерной трещины отрыва $V_Т$ при $(l - c) / l << 1$ приблизительно определяется следующим выражением

$$V_Т = 2(1-\nu^2)\, \pi [S_0 (2d_* l)^{1/2} \sigma_1^0 + l^2 (p - \sigma_3^0)] / E.$$

Здесь d_* – эффективный размер трещинопорождающего дефекта (см. (2.18)). Масса свободного газа в макротрещине равна суммарной массе свободного газа, первоначально заключенного в цепочке из N пор, через которые проходит макротрещина (см.рис.2.5,а). В случае протяженной макротрещины можно считать $N \sim 2l / S_0$.

Падение давления газа в макротрещине при изменении ее длины согласно (3.1) будет определяться равенством

$$p_0 \ (l d_0^2 / (4 S_0))^n = p\, [l\, d_0^2 / (4 S_0) + (1-\nu^2)(2d_* l)^{1/2} \sigma_1^0 / E +$$
$$+ (1-\nu^2)\, l^2 (p - \sigma_3^0) / E\,]^n \quad , \qquad (3.5)$$

где d_0 – диаметр поры.

Полагая, что для протяженных трещин справедливо $d_0^2 / (4 S_0 l) << 1$, соотношение (3.5) можно упростить

$$p / \sigma_3^0 \approx 1 + (E/(1-\nu^2))[(p_0 / \sigma_3^0)^{1/n} - 1]\, d_0^2 / (4 S_0 l). \qquad (3.6)$$

Соотношения (3.4) и (3.6) определяют условия равновесия открытой макротрещины в содержащем свободный газ в крупнопористом материале. Нетрудно убедиться, что система уравнений (3.4) и (3.6) имеет действительное решение при условии

$$\sigma_1^0 < \sigma_S \equiv K_{1c} (2/\pi d_*)^{1/2}$$

В этом случае длина равновесной трещины определяется выражением

$$l = \frac{E^2 d_0^4}{2} \left[\left(\frac{p_0}{\sigma_3^0} \right)^{1/n} - 1 \right]^2 \left[\left(1 - \nu^2\right)^2 S_0^2 d_* \left(\sigma_S - \sigma_1^0\right)^2 \right]^{-1}, \qquad (3.7)$$

а давление газа в трещине

$$p = \sigma_3^0 + 2\left(1 - \nu^2\right) S_0 d_* \left(\sigma_S - \sigma_1^0\right)^2 \left[\left(p_0 / \sigma_3^0\right)^{1/n} - 1 \right]^{-1} / \left(E d_0^2\right). \qquad (3.8)$$

Можно показать, что в этом случае $dK_1 / dl < 0$. Таким образом при условии, что начальное давление в порах p_0 превышает величину бокового поджатия σ_3^0, а нагрузка σ_1^0 меньше проч-

ности σ_S открытая макротрещина оказывается устойчивой. Если максимальная нагрузка σ_1^0 превышает значение σ_S, то равновесная открытая макротрещина существовать не может, ее размер становится неограниченным, а давление газа в ней, как следует из (3.6), стремиться к значению бокового поджатия σ_3^0.

Рассмотрим теперь случай, когда начальное давление в порах меньше боковой нагрузки $p_0 < \sigma_3^0$, при этом выполняется соотношение $\sigma_1^0 >> \sigma_3^0 - p_0$. В этом случае микротрещины отрыва могут прорастать и, соединяясь, образовывать макротрещину только за счет действия фактора микронеоднородности породы (влияния пор). Макротрещина может иметь смыкание берегов в центральной части, что не препятствует ее росту. Поэтому исследуем далее поведение закрывающейся трещины отрыва в газоносном крупнопористом материале (см. рис. 2.5,б).

Макротрещины отрыва с сомкнутыми берегами в материалах типа горных пород не являются закрытыми для газа. Микронеоднородность пород является причиной появления необратимых микродеформаций на берегах образующейся макротрещины. При последующем налегании ее берегов между берегами остаются микропромежутки, соединенные каналами между собой. (Неплотное налегание берегов трещины является причиной того, что мы видим закрытую трещину). Учитывая это, будем считать, что в частично закрытой трещине (см.рис. 2.5,б) давление газа всюду одно и то же.

С ростом трещины длина ее открытых концов меняется слабо, влияние концов на изменение давления становится незначительным. Поэтому в достаточно длинной закрытой макротрещине устанавливается давление, приблизительно равное начальному давлению газа в порах, т.е. $p \approx p_0$.

Таким образом, напряженное состояние вблизи частично закрытой макротрещины в крупнопористом материале можно найти из решения задачи, граничные условия которой на трещине имеют следующий вид

$$
\begin{aligned}
&\tau_{xy}(x,0) = 0, && |x| \le l, \\
&\sigma_y(x,0) = P\delta(|x| - c) + p_0, && b < |x| \le l, \quad (3.9) \\
&\mathrm{v}(x,0) = 0, && |x| \le b,
\end{aligned}
$$

где v – компонента смещения по оси ОУ, 2 b – размер области смыкания в центре трещины.

В точках $x = \pm b$ потребуем ограниченность напряжений, что равносильно условию плавного смыкания берегов $\partial \mathrm{v} / \partial x = 0$. Условия на бесконечности определяются соотношениями (3.3).

Решая задачу (3.9) методом, изложенным в [76], находим, что коэффициент интенсивности напряжений у кончика трещины с учетом (2.19) имеет вид

$$K_1 = \left(\pi\, d_* / 2\right)^{1/2} \sigma_1^0 - \pi^{1/2}(l-b)^{1/2}\left[2-(l-b)/l\right]^{1/2}\left(\sigma_3^0 - p_0\right), \qquad (3.10)$$

где $(l-b)$ – длина открытого конца трещины.

Уравнение, связывающее полудлину закрытого участка с нагрузкой и полудлиной протяженной макротрещины, можно получить из условия однозначности смещений (аналогично было получено соотношение (2.15)). При естественном условии $S_0 / l << 1$ имеем

$$k\left[\mathrm{E}(k) - \left(1-k^2\right)\mathrm{K}(k)\right] / \mathrm{E}(k) = S_0\left(d_* / 2\right)^{1/2} \sigma_1^0\left[\left(\sigma_3^0 - p_0\right) l^{3/2}\right]^{-1}, \qquad (3.11)$$

где $k = (l^2 - b^2)/l$; $\mathrm{K}(k)$, $\mathrm{E}(k)$ – полные эллиптические интегралы первого и второго рода соответственно.

Анализируя изменение коэффициента интенсивности напряжений с ростом длины трещины можно усмотреть, что за счет роста второго слагаемого он незначительно убывает. Следовательно, рост протяженной макротрещины в крупнопористом материале в случае, когда начальное давление в порах меньше боковой нагрузки, происходит со слабой устойчивостью. Степень устойчивости роста трещины близка к безразличному равновесию. Этот результат соответствует случаю развития трещин в крупнопористом материале, не содержащем газа.

3.3. Микротрещинная модель с учетом свободного газа

Микротрещинную модель целесообразно использовать для анализа условий развития трещин отрыва в газоносных породах, которые можно отнести к трещиноватым породам со сложной микроструктурой (например, для углей). Математическая модель макротрещины без учета свободного газа изложена в п.2.5. Здесь, сохраняя обозначения раздела 2.5., в эту модель включены члены, отражающие влияние свободного газа.

Рассмотрим сначала короткую макротрещину. Условие роста трещины длины $2l$ с учетом свободного газа в трещине записывается в виде

$$K_1 = \left(\pi\, l\right)^{1/2}\left(\gamma_1 \sigma_1^0 - \gamma_3 \sigma_3^0 + p\right). \qquad (3.12)$$

Давление газа в макротрещине p и ее длина в соответствии с (3.1) связаны соотношением

$$p_0(2l\ \eta) = pV_T^n. \qquad (3.13)$$

Здесь η – эффективный начальный просвет природных микротрещин, p_0 – начальное давление свободного газа в микротрещинном замкнутом пространстве, V_T – объем двумерной трещины

$$V_T = 2(1-\nu^2)\pi\ l^2(\gamma_1\sigma_1^0 - \gamma_3\sigma_3^0 + p)/E.$$

При реальных для угля значениях параметров справедлива оценка

$$E\eta/[2(1+\nu)l\ (\gamma_1\sigma_1^0 - \gamma_3\sigma_3^0)] << 1.$$

Поэтому из (3.12) получаем

$$p/p_0 = \left\{E\eta\left[(1-\nu^2)\pi l\ (\gamma_1\sigma_1^0 - \gamma_3\sigma_3^0)\right]^{-1}\right\}^n. \qquad (3.14)$$

Подставляя (3.14) в (3.12), находим

$$K_1 = (\pi l)^{1/2}(\gamma_1\sigma_1^0 - \gamma_3\sigma_3^0) +$$
$$+(\pi l)^{1/2-n} p_0\left\{E\eta\left[(1-\nu^2)\cdot(\gamma_1\sigma_1^0 - \gamma_3\sigma_3^0)\right]^{-1}\right\}. \qquad (3.15)$$

При $n > 1/2$, что имеет место для реальных газов, коэффициент интенсивности напряжений K_1 с ростом длины трещины сначала падает, а затем по достижении трещиной некоторой критической длины $2l_k$ начинает возрастать. Значение l_k определяется из условия экстремума для K_1, которое дает

$$l_k = E\eta(1-\nu^2)^{-1}\left[(2\eta-1)p_0\right]^{1/n}(\gamma_1\sigma_1^0 - \gamma_3\sigma_3^0)^{-(n+1)/n}. \qquad (3.16)$$

Таким образом, очень короткая макротрещина должна устойчиво подрастать по мере увеличения σ_1^0 или уменьшения σ_3^0, что объясняется сильным влиянием изменения давления газа в короткой трещине. Если длина макротрещины увеличится и достигнет значения l_k, рост трещины становится неустойчивым.

Оценим падение давления газа в макротрещине при достижении в ее центре предельного расхождения берегов h_*. Учитывая, что смещение берегов короткой магистральной трещины описывается выражением

$$\mathrm{v}(x,0) = 2(1-\nu^2)(l^2 - x^2)^{1/2}(\gamma_1\sigma_1^0 - \gamma_3\sigma_3^0 + p)/E,$$

имеем

$$h_* = 4(1-\nu^2)l_*(\gamma_1\sigma_1^0 - \gamma_3\sigma_3^0 + p)/E. \qquad (3.17)$$

Здесь $2l_*$ – минимальная длина макротрещины, при которой берега порождающих ее микротрещин начинают выходить из зацепления. Подставляя получаемое из (3.17) выражение l_* в (3.13), находим

$$p/p_0 = \left[4\eta\ /(\pi\, h_*)\right]^n. \qquad (3.18)$$

Поскольку для реальных углей, как можно заключить из [120], справедливо неравенство $\eta\ /h_* < 0{,}02$, то можно сделать вывод о весьма значительном падении давлении газа (в несколько десятков раз) в макротрещине при достижении предельного расхождения ее берегов. По этой причине в анализе роста более протяженных макротрещин давлением свободного газа в трещине можно пренебречь. Поэтому многие выводы в отношении развития протяженных макротрещин, полученные в гл. 2, справедливы и для газоносных пород.

3.4. Основные выводы в отношении влияния свободного газа

Из анализа развития макротрещин в газоносных породах, содержащих свободный газ, можно сделать следующие выводы.

В газоносных породах, к которым применима поровая модель, возможны следующие ситуации отрывного трещинообразования. Если начальное (природное) давление газа в порах превышает минимальное главное напряжение в породе, а максимальное напряжение меньше прочности породы при одноосном сжатии, то в породе возможно образование открытых макротрещин. Рост небольших макротрещин может быть динамическим. После остановки трещина должна устойчиво подрастать по мере увеличения продольной или уменьшения боковой нагрузки.

Если максимальное напряжение в газоносной породе превышает прочность при одноосном сжатии, и начальное давление свободного газа в порах больше минимального главного напряжения, то открытые макротрещины должны распространяться неограниченно.

При полном отсутствии боковых сжимающих напряжений открытые макротрещины могут неограниченно расти даже при малой величине давления свободного газа.

Если максимальное напряжение сжатия в газоносной породе превышает ее прочность при одноосном сжатии, и вместе с тем, начальное давление газа в порах немного меньше минимального главного напряжения, то в породе возможно прорастание протяженных, самозакрывающихся отрывных трещин. Трещины могут

располагаться близко одна к одной, тем самым образуя в газоносной пористой породе область наведенной трещиноватости.

Газоносная порода, описываемая микротрещинной моделью, должна проявлять иной характер отрывного разрушения. Отличительная особенность разрушения этой породы состоит в том, что влияние свободного газа сказывается лишь в начале роста макротрещин. Из-за падения давления газа развитие коротких трещин может остановиться. Однако если трещины достаточно выросли, то вследствие слабого влияния давления газа их дальнейшее развитие определяется только напряженным состоянием породы. Поэтому развитие протяженных трещин должно быть динамическим, как и в негазоносной породе.

Другая особенность развития трещин в микротрещиноватых породах состоит в том, что у макротрещин всегда имеет место взаимодействие берегов, и следовательно, трещины отрыва не являются открытыми в обычном смысле. По этой причине протяженные-макротрещины могут располагаться близко одна к одной, образуя область интенсивной наведенной трещиноватости. Однако давление свободного газа в этой области по сравнением с начальным давлением в микротрещинном пространстве может упасть в десятки раз.

Этот вывод имеет значение для горных пород, содержащих сорбированный газ. Сильное падение свободного газа при развитии трещин должно вызвать интенсивную десорбцию газа в области наведенной трещиноватости. Количество десорбированного газа должно расти со временем, и как следствие, должно повышаться давление свободного газа.

Возможность образования скрытых областей интенсивной наведенной трещиноватости имеет для газоносных пород особое значение. В газоносной породе эти почти разрушенные области, насыщенные свободным газом, являются потенциальными очагами локальных внезапных выбросов. Как показало проведенное выше исследование, образование таких очагов может происходить в породах с разной микроструктурой.

3.5. Влияние абсорбата на развитие трещин

Как известно, в газоносной породе газ может находиться не только в свободном, но и в сорбированном (адсорбированном и абсорбированном) состоянии. Например, в каменном угле почти весь метан (до 95%) находится в сорбированном состоянии, и лишь 5% метана находится в свободном состоянии в крупных порах. Поэтому газоносность угольных пластов характеризуют по сорбционным свойствам углей. На основании сорбционных свойств

прогнозируется газообильность шахт, а также рассчитывается количество газа, которое может выделиться в горные выработки при внезапном выбросе [1,16].

Тем не менее, в математических моделях внезапных выбросов [53,63,122] газ (метан, углекислота), находящийся в сорбированном состоянии, не рассматривается. Предполагается, что можно объяснить наиболее существенные процессы разрушения угля, происходящие при выбросах, учитывая лишь свободный газ в порах. Для такого предположения существует определенное обоснование – сорбированный газ вследствие относительно большого времени десорбции из угольного вещества не может играть активную роль в динамических процессах разрушения угля.

В последнее время в некоторых отечественных и зарубежных работах от этого предположения начинают отказываться и предпринимаются различные попытки учета сорбированного газа. Например в [132,135] затрагивается вопрос о влиянии на процесс подготовки и протекания выброса абсорбированного метана (в другой концепции – метана, растворенного в твердом угольном веществе). Однако нам не известны работы, в которых этот вопрос изучался бы с позиции теории трещин. Некоторое отношение к рассматриваемому вопросу имеет наша работа [17], в которой оценивается влияние сорбированного метана (абсорбата) на трещиностойкость угольного вещества.

В [17] сделана оценка энергии межмолекулярного взаимного отталкивания молекул абсорбированного метана, плотно заполняющего микропоры диаметром несколько десятков ангстрем. Аналитически установлено, что энергия межмолекулярного отталкивания, аккумулированная в микропорах, соизмерима с энергией ван-дер-ваальсовых и водородных связей между структурными элементами угольного вещества.

При изменении силового состояния структурных элементов часть энергии межмолекулярного отталкивания молекул сорбата передается угольному скелету. При разгрузке угольного вещества от внешнего давления это может вызвать растяжение некоторых структурных элементов и даже разрыв силовых связей. Таким образом, взаимодействие отталкивания молекул абсорбата и угольного вещества может явиться начальной движущей силой процесса разрушения угольного вещества при его разгрузке от внешних напряжений.

Вследствие очень высокой концентрации микропор разрушение структурных связей на уровне микропор должно влиять на разрушение угля в масштабе крупных пор и микротрещин. При односторонней разгрузке природного метанонасыщеного угля микрообласти растяжения структурных элементов должны локали-

зоваться вблизи более крупных перераспределителей напряжений (макропор, кончиков микротрещин сдвига и т.п.). Следовательно, вблизи концентраторов напряжений может происходить микроразрушение угольного вещества под действием абсорбированного метана. Этот фактор ранее не учитывался при анализе системы уголь-метан в оценке выбросоопасности пласта.

Как показано в [17], дополнительное воздействие сорбированного газа на угольное вещество при снятии внешних напряжений существенно уменьшает коэффициент поверхностного натяжения угольного вещества (в 2,5–4 раза), а следовательно, в 1,6–2 раза уменьшает значение трещиностойкости и прочностные свойства угля. Это следует учитывать в количественных оценках развития трещин в угле в связи с исследованием условий подготовки внезапных выбросов угля и газа. В частности, именно очень низкая трещиностойкость может служить причиной хрупкого разрушения природного газоносного угля, который в дегазированном состоянии является пластичным телом.

Следует заметить, что эффект охрупчивания материалов под воздействием внешних факторов известен давно, например охрупчивание пластичных металлов водородом [37,124]. Локальное наводороживание металла в малой области кончика микротрещины вызывает образование дополнительных внутренних напряжений, которые обусловлены действием атомов водорода на атомы металла. В результате взаимодействия атомов происходит разрыв структурной связи в металле.

Поскольку водород в металл поступает по механизму диффузии, прорастание устойчивой микротрещины осуществляется локально, очень небольшими проскоками. В целом докритический рост микротрещины является очень медленным, квазистатическим.

Влияние абсорбата на угольное вещество похоже на охрупчивание металлов водородом. Вместе с тем эти два случая имеют принципиальное различие. Молекулы метана изначально находятся в угле. Процесс разрушения структуры угольного вещества не связан с диффузией метана, поэтому процесс разрушения может быть самоподдерживающимся, динамическим даже при развитии микротрещин, что имеет решающее значение для разрушения природного угля при выбросах.

Таким образом, можно сделать следующий вывод. При резких изменениях напряженного состояния уголь, предельно насыщенный метаном, предрасположен к хрупкому разрушению, более того он склонен к хрупкому разрушению динамического типа.

Глава 4.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Моделирование является необходимым после теории элементом геомеханического исследования, связывающего его фундаментальную часть с прикладными вопросами. Раскрывая взаимосвязь природных и техногенных факторов, моделирование, конечно, далеко не всегда может привести к решению конкретных горнотехнических задач по совершенствованию технологии и повышению безопасности горного производства. Но оно создает основу для принятия таких решений.

4.1. Структура наведенной трещиноватости массива у стенки выработки

Изучение особенностей распространения макротрещин вблизи свободной поверхности позволяет глубже понять структуру наведенной трещиноватости массива горных пород вблизи стенки выработки. Возможная картина трещиноватости, построенная с учетом результатов моделирования развития трещин вблизи плоской стенки выработки, показана на рис. 4.1.

Непосредственно вблизи свежего обнажения пород в выработке, пройденной в массиве хрупких слаботрещиноватых пород, должна сформироваться зона, в которой наведенные трещины искривлены и соединяются между собой (на рисунке отмечены цифрой *2*). Если эти трещины выходят на поверхность обнажения *1*, то образуют заколы. Массив в этой зоне не должен обладать связанностью. Куски породы вогнуто-выпуклой формы слабо сцеплены между собой. Поэтому они могут отпадать от массива самопроизвольно или быть отбиты при помощи лома. Этот теоретический вывод подтверждает необходимость оборки заколов в целях обеспечения безопасности горнорабочих в выработках.

В глубине массива должна находиться другая зона наведенной трещиноватости, в которой трещины ориентированы примерно параллельно друг другу и не соединяются между собой (на рисунке одна из таких трещин отмечена цифрой *3*). Трещины в этой зоне могут быть достаточно протяженными, по нашей оценке более метра, но они не должны разбивать массив горных пород на отдельные фрагменты. В этой зоне массив должен быть связанным.

Мощность зоны несвязанного массива D можно оценить с помощью соотношения

$$D \sim (3 \div 5)\, l_* \,, \qquad (4.1)$$

Рис. 4.1. Наведенные трещины отрыва вблизи стенки выработки: 1 – поверхность обнажения пород; 2 – криволинейные соединяющиеся трещины; 3 – трещина, растущая вдоль обнажения

где l_* – критическая полудлина макротрещины отрыва. Она определяется с помощью соотношения (2.26), включающего параметр микроструктуры породы. Например в долерите, данные о физико-механических свойствах которого приведены в п.2.5.5, мощность зоны несвязанного массива у поверхности обнажения должна составлять от 30 до 75 см, в базальте от 9 до 20 см.

С другой стороны, если мощность зоны несвязанного массива оценивается из геофизических экспериментов (например, используя методику, разработанную в [95]), то с помощью соотношения (4.1) можно оценить критическую длину макротрещины отрыва в породе.

Зону несвязанного массива иначе можно назвать зоной дезинтеграции массива. Иногда ее называют зоной руинного разрушения. Ясно, что эта зона играет большую роль в устойчивости обнажений пород в выработках.

Исходя из зависимости коэффициента интенсивности растягивающих напряжений и длины криволинейной отрывной трещины (см. рис.2.16), можно заключить, что образование закола должно быть динамическим процессом. Рост отрывных трещин, растущих параллельно обнажению, также может происходить динамически, но интенсивность этого процесса должна быть выражена значительно слабее.

Таким образом из вышеизложенного следует, что структура наведенной трещиноватости массива вблизи свежего обнажения пород в глубокой выработке не может быть однотипной. Непосредственно у стенки выработки (а также у забоя) должны образоваться искривленные отрывные трещины, а на некотором расстоянии от обнажения трещины должны быть ориентированы в одном направлении (в направлении действия наибольшей сжимающей

нагрузки). В последнем случае они могут быть протяженными и близко располагаться одна к одной, но не должны соединяться и дезинтегрировать массив.

Результаты модельных исследований по структуре трещиноватости согласуются с данными натурных наблюдений трещиноватости, а также с данными о динамических проявлениях стреляния и шелушения пород в выработках.

Действительно, как отмечалось в гл. 1, образование заколов на стенках глубоких выработок является, как правило, динамическим процессом (стреляние пород). После удаления слоя вогнуто-выпуклых заколов со стенки выработки можно получить относительно гладкую поверхность. Она образована поверхностями трещин отрыва, которые были ориентированы вдоль контура обнажения. Возможные отслоения пород слабой интенсивности (шелушение пород) в этом случае представляют собой пластинки.

Сильное влияние зоны приповерхностной дезинтеграции пород на устойчивость обнажений подтверждает целесообразность двухэтапной проходки глубоких выработок. Такой прием повышения устойчивости выработок предлагался в некоторых отечественных и зарубежных работах, например, в [60]. Сначала проходится небольшая предварительная выработка малого сечения, в которой образуется приповерхностная зона дезинтеграции пород. Затем сечение выработки расширяется до проектного путем повторной проходки, при этом снимается слой дезинтегрированных пород. После второй проходки наведенные трещины в массиве ориентированы вдоль обнажения, что обеспечивает длительную устойчивость выработки.

4.2. Формоизменение сечения горной выработки

Если главные компоненты напряжений в нетронутом массиве не равны друг другу, то вследствие самопроизвольного отслоения пород на стенках или в кровле выработка может изменить свою проектную форму. Поэтому целесообразно провести моделирование изменения сечения выработки и определить ту (устойчивую) ее форму, которая образуется после прекращения отслоения пород.

Процесс отслоения пород со стенок выработки трактуется в литературе неоднозначно. В [18,24,48] считается, что динамическое отслоение пород (стреляние) связано с наличием на обнажении выступающих частей. Неровность контура влияет на распределение напряжений и вызывает локальное разрушение породы. В других работах, например в [104,106], полагается, что разрушение гладкой стенки выработки может быть обусловлено локальными

растягивающими напряжениями в массиве, вызванными неоднородностью самой породы.

Здесь рассматривается другой механизм отслоения пород, который соответствует изложенной выше теории. Физически процесс разрушения стенок выработки можно представить следующим образом.

Если на стенке выработки выполняется критерий отрывого разрушения, то в этом месте происходит разрушение породы и она отделяется от стенки выработки. В результате изменяется форма выработки и происходит перераспределение напряжений. В некоторой области массива снова выполняется критерий разрушения. Это вызывает новое отслоение породы. Процесс повторяется снова, он продолжается до образования устойчивой формы выработки.

Таким образом, расчет изменения сечения выработки можно разбить на ряд этапов, на каждом из которых выполняются следующие операции [73,93]:

– находится напряженно-деформированное состояние массива горных пород в окрестности выработки;

– проверяется выполнение критерия разрушения горной породы во всех точках исследуемой области;

– строится новая форма сечения выработки по результатам анализа выполнения критерия разрушения;

– проверяется критерий остановки счета.

Для облегчения моделирования введены некоторые упрощения, которые позволили провести математическое исследование на ЭВМ без привлечения сложных вычислительных программ. Расчеты формоизменения сечения проведены в условиях плоской деформации для выработки, первоначально имевшей круглую форму. Для нахождения напряженно-деформированного состояния массива горных пород использован метод конечных элементов. В рассмотренных примерах на границе расчетной области исходное распределение напряжений задавалось формулами:

$$\sigma_1^0 = \chi \gamma H, \quad \sigma_3^0 = \gamma H,$$

где χ – коэффициент бокового распора, γ – удельный вес налегающих пород, H – глубина разработки.

В расчетах нужно было выбрать условие, которое показывало бы, когда следует окончить вычислительный процесс по заданному выше алгоритму. Очевидно, что расчеты надо продолжать до тех пор, пока будет выполняться критерий разрушения породы. Однако оказывается, что если ограничиться только этим, то возможен бесконечный процесс, т.е. всегда после очередного шага найдутся точки, в которых будет выполнен критерий разрушения. Область,

которую заполняют эти точки, будет от шага к шагу все больше локализоваться и выродится в конце в некоторую линию.

Этот бесконечный процесс можно оборвать, введя условие остановки по неизменности формы основной части выработки от одного этапа расчета к другому. Метод конечных элементов, вообще говоря, автоматически реализует эту возможность, так как детальность анализа в этом методе ограничена размерами элементов. В рассмотренных ниже примерах расчет заканчивался при получении двугранного угла. Форма двугранного угла (или шатрообразная форма) наблюдается на практике как устойчивая форма выработки, образующая по окончании стреляния и шелушения пород.

Остановимся на критерии разрушения породы. Поскольку рассматривается отслоение кусков породы, уже утративших прочную связь с массивом, нецелесообразно использовать критерий разрушения, основанный на оценке поведения трещин в ненарушенной породе. В качественных оценках можно использовать более простой критерий, например следующий: порода на контуре выработки считается полностью отслоившейся, если наибольшее сжимающее напряжение в ней по абсолютной величине превышает некоторое критическое значение, т.е.

$$\sigma_1 > \sigma_{кр} , \qquad (4.2)$$

где σ_1 – главное сжимающее напряжение, $\sigma_{кр}$ – некоторая критериальная величина. При нулевых радиальных напряжениях именно к такому виду критерия разрушения породы на стенке выработки сводятся критерий по наибольшим деформациям растяжения (2.2) и критерий предельного равновесия макротрещины (2.31). Непосредственно такой вид имеет критерий, сформулированный в [147].

Расчеты формоизменения сечения выработки показали, что при не равных главных напряжениях в нетронутом массиве устойчивая форма выработки связана с образованием двугранного угла, вершина которого ориентирована в направлении действия меньшего из главных напряжений. Величина отслоившейся части породы тем больше, чем больше разница в величинах главных напряжений.

На рис. 4.2 и 4.3 показаны построенные с помощью ЭВМ формы сечения одиночной выработки по этапам расчета при различных соотношениях главных напряжений в нетронутом массиве (σ_1^0/σ_3^0 равно 2 и 3 соответственно). Расчеты проводились в предположении упругости массива при одних и тех же соотношениях критериальной величины и параметра исходного напряженного состояния σ_1^0. Буквами на рисунках отмечены по этапам расчета

те области, в которых выполнялся критерий (4.2) и которые не учитывались на последующих этапах расчета.

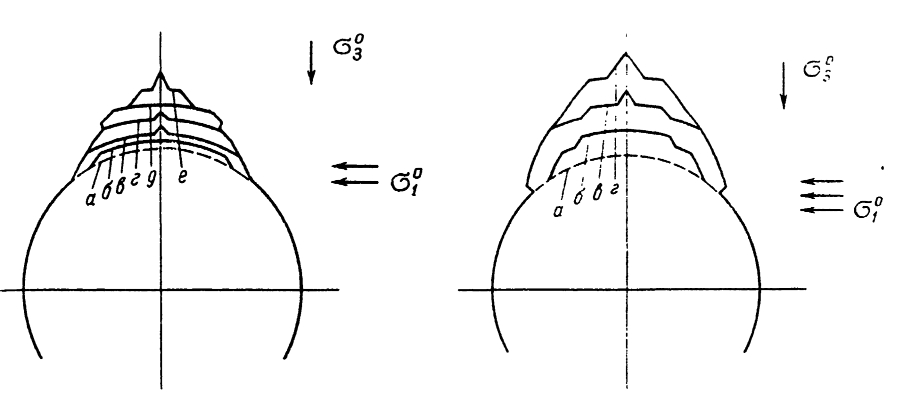


Рис. 4.2. Изменение формы сечения одиночной выработки в массиве упруго-хрупкой породы. Коэффициент бокового распора $\chi = 2$; $(\sigma_1^0/\sigma_3^0 = 2)$

Рис. 4.3. Измененииеа формы сечения одиночной выработки. Коэффициент бокового распора $\chi = 3$; $(\sigma_1^0/\sigma_3^0 = 3)$

Величина образующегося угла в кровле выработки приблизительно составляет 80° – 100°, что соответствует результатам натурных наблюдений (см. например рис.1.7).

Можно отметить, ссылаясь на нашу работу [73], что учет зоны нелинейного деформирования породы, значительно увеличивая объем вычислений, не сильно меняет картину формоизменения сечения выработки кругового поперечного сечения *1* (рис. 4.4). Наличие области нелинейного деформирования *3* лишь "тормозит" развитие отслоений породы. Контур устойчивой выработки и в этом случае содержит угол, в вершине которого отслоение останавливается.

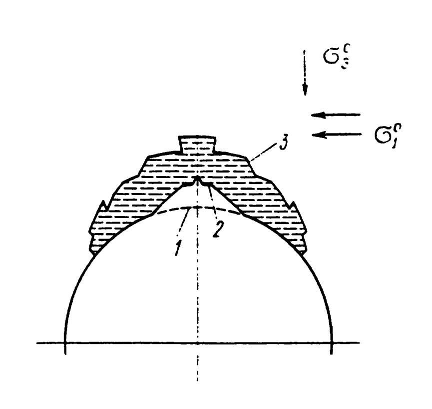
Из проведенного моделирования можно сделать следующие выводы.

1. Если в нетронутом массиве главные напряжения равны и выработка находится вне зоны опорного давления, то происходит равномерное отслоение породы со стенок и кровли выработки.

2. Если главные напряжения, действующие вкрест направления проходки выработки, не равны, то отслоение породы со стенок

Рис. 4.4. Устойчивая форма выработки с учетом нелинейного деформирования породы:

1 – проектный контур сечения; *2* – контур сечения устойчивой выработки; *3* – граница зоны нелинейного деформирования



выработки развивается преимущественно в направлении действия наименьшего главного напряжения.

3. Устойчивая форма выработки имеет элемент в виде двугранного угла, в вершине которого отслоение породы останавливается. Величина угла составляет примерно 80° – 100°.

4. Для повышения безопасности и с целью уменьшения затрат на крепление глубоких выработок в проектный контур выработки целесообразно включать элемент двугранного угла.

В заключение отметим, что проведенный расчет изменения формы сечения выработки соотвествовал одному из практических подходов к исследованию устойчивости выработок и скважин. В этом подходе явно учитывается разрушение породы.

Некоторые другие подходы к оценке утойчивости горных выработок и скважин связаны с исследованием процесса деформирования породы, которая считается нелинейно деформируемой. При определенных условиях в нелинейно-деформируемой породе возможна бифуркация деформаций, например появление вблизи выработки деформаций, подобных искривлениям [35,75,182]. Эти периодические деформации внешне подобны изгибу поверхности стенки выработки. В зависимости от периода деформации определенные участки стенки выработки претерпевают радиальное растяжение, которое может привести к разрыву в точках, расположенных внутри стенки.

Имея это проявление неустойчивости в виду, следует признать, что в общем случае процесс отслоения пород со стенок выработок может быть более сложным, чем он трактуется в этой книге. Однако для упруго-хрупкой породы предпринятый подход к оценке устойчивости выработок дает вполне пригодные для практики результаты.

4.3. Развитие трещины гидроразрыва

4.3.1. *Подход к исследованию гидроразрыва.* При закачивании в массив горных пород через скважину воды под большим давлением в нем может образоваться трещина отрыва, которая развивается по мере повышения давления воды. Явление образования и развития такой трещины получило название гидравлический разрыв массива (или гидроразрыв).

Гидроразрыв осуществляют для управляемого геомеханического воздействия на массив горных пород. Например, гидроразрыв массива проводят с целью повышения нефтеотдачи пласта, для превентивной дегазации угольного пласта, определения напряженного состояния горных пород, безопасного для окружающей среды захоронения технических ядовитых жидкостей, для создания геотермальных систем в горячих горных породах и других целей.

Более четырех десятилетий гидроразрыв является предметом теоретического и экспериментального изучения. Многочисленные ссылки на оригинальные работы можно найти в [39,103,153]. Теоретические исследования проводятся обычно методами механики сплошной среды, поскольку гидроразрыв представляется комплексным процессом, включающим элементы не только теории разрушения, но и деформирования горных пород, гидромеханики, теории фильтрации, реологии жидкости и горных пород.

Несмотря на значительные успехи в теоретическом описании гидроразрыва некоторые вопросы остаются неясными. Например, можно считать открытым вопрос о развитии трещины гидроразрыва при давлении закачивания воды меньше горного. Такие случаи происходят на ряде нефтяных месторождений при осуществлении провоцируемого гидроразрыва, а также при бурении нефтяных и газовых скважин [118].

Согласно гипотезе С.А.Христиановича, посвященной этому вопросу, вследствие пластической деформации во время бурения малопрочных пород происходит уменьшение местных напряжений. Это влияет на последующее проведение гидроразрыва, снижая давления разрыва. Однако имеются полевые данные о том, гидроразрыв с образованием вертикальной трещины возможен при низком давлении воды в хрупких скальных породах.

Из приведенных в гл.1 данных натурных наблюдений следует, что в горных породах макротрещины отрыва могут развиваться даже без воздействия воды. В гл.2 изложена теория трещин отрыва, учитывающая микроструктуру породы и особую роль главного напряжения, действующего вдоль трещины. Логично использовать данные натурных наблюдений отрывного разрушения и разработанную теорию в анализе развития трещины гидроразрыва.

Следуя нашей работе [91], рассмотрим одну из самых простых моделей гидроразрыва. Она позволяет качественно проиллюстрировать некоторые особенности развития протяженных трещин гидроразрыва в нетронутом массиве при неравных компонентах главных напряжений.

Будем рассматривать массив крупнопористой горной породы. Поры заполнены природным флюидом при давлении p_0 . Природное напряженное состояние минерального скелета горных пород описывается главными компонентами напряжений

$$\sigma_1 = \sigma_1^0 - p_0 , \quad \sigma_2 = \sigma_2^0 - p_0 , \quad \sigma_3 = \sigma_3^0 - p_0 . \qquad (4.3)$$

Здесь σ_1^0 , σ_2^0 , σ_3^0 – полные главные напряжения "на бесконечности".

Пусть в этом массиве пробурена скважина, так что ее ось симметрии совпадает с направлением действия промежуточного главного напряжения σ_2^0 . Схема к задаче показана на рис. 4.5.

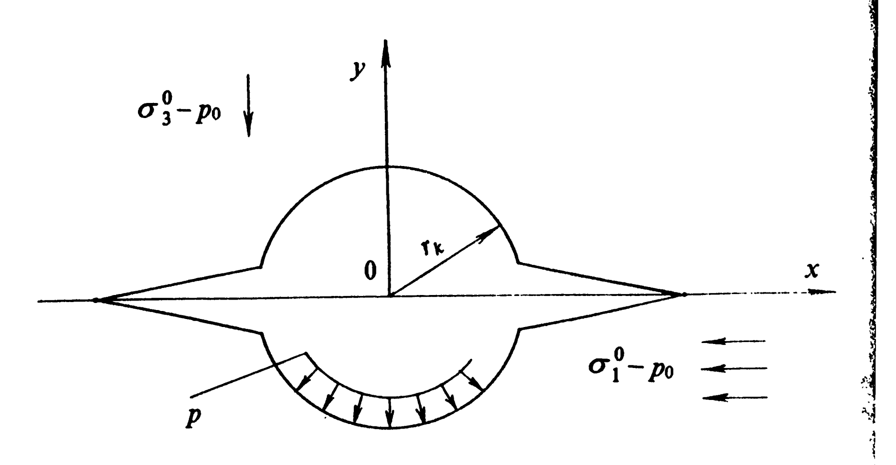


Рис. 4.5. Схема к задаче о развитии трещины гидроразрыва

В скважине под давлением находится достаточно вязкая жидкость, которая не фильтруется во вмещающий массив горных пород. При повышении давления жидкости выше критического $p_{кр}$ в массиве вдоль оси скважины образуется трещина гидроразрыва, которая ориентирована перпендикулярно направлению действия минимального главного напряжения σ_3^0 и растет в направлении

действия наибольшего главного напряжения σ_1^0 . Исследуем равновесное состояние трещины гидроразрыва при различных значениях параметров задачи.

4.3.2. *Начало разрушения.* В анализе разрушения породы при гидроразрыве необходимо разделять два вопроса: 1) начальное разрушение стенки скважины под действием давления жидкости; 2) развитие трещины под действием закачиваемой в нее жидкости. Механизмы начального разрушения породы на стенке скважины и трещинообразования в глубине массива различны.

Для решения первого вопроса обычно рассматривается в упруго-хрупкой среде круглое отверстие или отверстие с выходящей из него зародышевой микротрещиной. Считается, что ввиду малого раскрытия микротрещины вязкая жидкость в нее не проникает. Поскольку в этом случае расклинивающее действие жидкость в горной породе не создает, а микротрещина очень мала, условием разрушения является предельное растяжение породы на стенке скважины. Для вывода критического соотношения часто используют теорию упругости. Тогда условие начала гидроразрыва вдоль оси скважины можно записать в следующем виде :

$$p_{кр} = 3\sigma_3^0 - \sigma_1^0 + \sigma_t - p_0 \ , \qquad (4.4)$$

где σ_t – прочность породы на растяжение. Имеются более сложные модели начала разрушения при гидроразрыве, например [55], однако в нашей оценке выбрана наиболее простая модель.

С началом проникновения жидкости в трещину изменяется условие разрушения. Во-первых, изменяется напряженное состояние вблизи конца трещины, что связано с началом расклинивающего действия жидкости в трещине. Во-вторых, равновесное состояние массива определяется равновесным состоянием нового объекта – трещины, которая в одних условиях может развиваться динамически, в других – квазистатически.

4.3.3. *Предельно равновесная трещина.* Рассмотрим в условиях плоской деформации модельную равновесную трещину, исходящую из круглого отверстия радиуса r_k (см. рис. 4.5). Суммарную длину трещины обозначим $2l$, длина одного конца $l - r_k$.

На минеральный скелет вблизи трещины действуют следующие силовые факторы: напряжение сжатия $\sigma_3^0 - p_0$ (вкрест направления распространения трещины); напряжение $\sigma_1^0 - p_0$ (вдоль трещины); давление жидкости $p - p_0$, приложенное к берегам

трещины и к стенке скважины. Будем считать, что давление в скважине p_k не меняется из-за роста трещины. Например, этот случай может иметь место при самопроизвольном разрыве буровым раствором массива горных пород на большой глубине в процессе бурения скважины.

Соотношение для коэффициента интенсивности напряжений в кончиках симметричных радиальных трещин, выходящих из круглого отверстия, приведено в [110]. Это соотношение использовано в [173] для вывода уравнения равновесия трещины гидроразрыва в непроницаемой горной породе.

Уравнение равновесия трещины из [173] часто используется в анализе гидроразрыва, особенно в связи с измерением напряжений в массиве горных пород. В свете вышеизложенной теории отрывного разрушения сжатых пород это уравнение не является удовлетворительным. Из него следует, что при росте трещины влияние наибольшего сжимающего напряжения уменьшается до нуля.

Влияние наибольшего сжимающего напряжения на рост трещины отрыва учтем с помощью введения в условие равновесия трещины специального члена, отражающего микроструктуру породы. Рассматривая крупнопористую породу, используем поровую модель макротрещины. В этом случае условие предельного равновесия трещины гидроразрыва (трещина в минеральном скелете) можно записать в виде

$$K_{1c} = \left(\pi r_k \lambda\right)^{1/2}\left[\left(\sigma_1^0 - \sigma_3^0\right)F_A(\lambda) + \left(p - p_0\right)F_C(\lambda) - \right.$$
$$\left. - \left(\sigma_3^0 - p_0\right)F_B(\lambda)\right] + \left(\sigma_1^0 - p_0\right)\left(\pi d_* / 2\right)^{1/2}. \quad (4.5)$$

Здесь $\lambda = \left(l / r_k\right) - 1$ – приведенная полудлина трещины, d_* – эффективный размер трещинопорождающего дефекта (2.19).

Функции $F_A(\lambda)$ и $F_B(\lambda)$ отражают влияние скважины и показаны на рисунке 4.6. Функция $F_C(\lambda)$ описывает изменение гидростатического давления жидкости с ростом длины трещины. Если жидкость проникает до самого конца трещины и давление ее в трещине всюду равно давлению жидкости в скважине, то $F_C(\lambda)=F_B(\lambda)$. В случае, когда давление жидкости линейно падает по длине трещины и в конце трещины в два раза ниже, чем в скважине, $F_C(\lambda) = F_C^*(\lambda)$. Функция $F_C^*(\lambda)$ показана на рис. 4.6.

Уравнение (4.5) отличается от аналогичного в работе [173] как по значениям функции $F_C(\lambda)$, так и наличием последнего слагаемого. Это слагаемое не зависит от длины трещины, как и левая часть уравнения. Следовательно, учет наибольшего главного на-

пряжения в массиве и учет микроструктуры породы приводит как бы к снижению значения трещиностойкости минерального скелета. Это важно для качественной и количественной оценки длины трещины гидроразрыва.

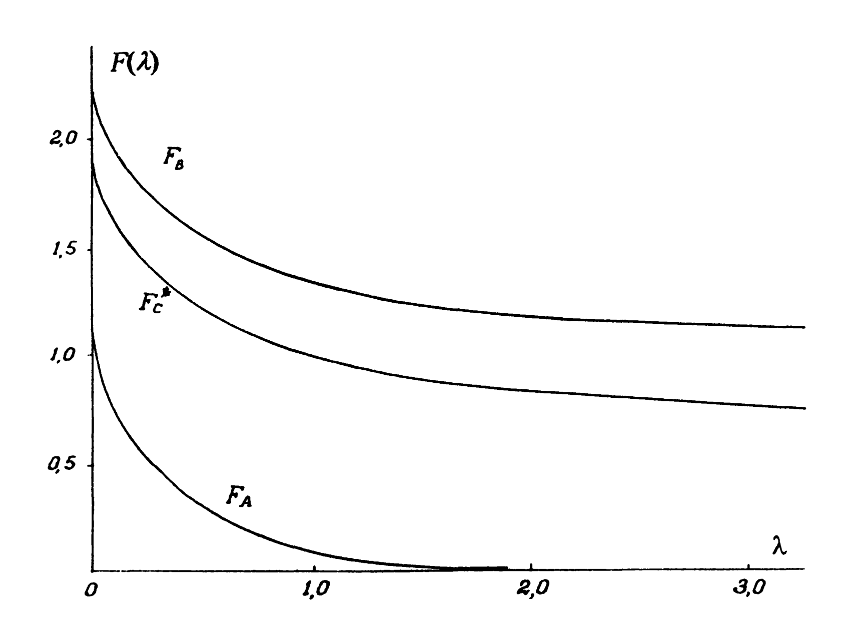


Рис.4.6. Графики функций, входящих в уравнение предельного равновесия трещины гидроразрыва

Заметим, что при предельном переходе $\lambda \to 0$ из условия равновесия трещины (4.5) нельзя получить начальное условие гидроразрыва (4.4). Из (4.5) следует, что начало гидроразрыва имеет место (при $F_C(\lambda) = F_C^*(\lambda)$), если

$$1{,}7\, p_{кр} \approx 3\sigma_3^0 - \sigma_1^0 + \sigma_t - 0{,}3\, p_0 \quad . \qquad (4.6)$$

Таким образом, согласно (4.5), для начала гидроразрыва требуется более низкое давление жидкости в скважине (примерно в два раза). Это связано с тем, что условие (4.6) описывает разрушение стенки скважины с начальной микротрещиной, в которую проникает жидкость. Последняя непосредственно участвует в разрушении, создавая расклинивающее действие. В этой связи следует упомянуть известный факт, что в проницаемых породах, в которых

жидкость легко может проникать в трещину, давление гидроразрыва $p_{кр}$ меньше, чем в случае слабопроницаемой породы.

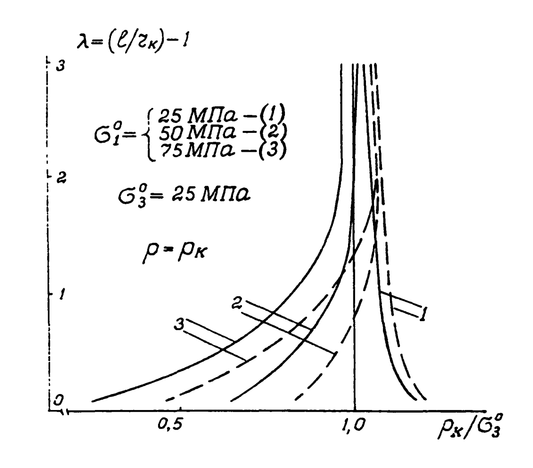
4.3.4. *Расчет длины трещины.* Используя уравнение (4.5), можно проводить расчеты длины вертикальной равновесной трещины гидроразрыва вблизи вертикальной скважины в зависимости от величины главных компонент природных напряжений и давления жидкости в трещине.

Для модельных расчетов взяты значения параметров, которые реальны для массива горных пород на глубине 1,5–2 км: наименьшая компонента горизонтальных напряжений σ_3^0 = 25 МПа; поровое давление природного флюида p_0 = 12 МПа; прочность породы на одноосное сжатие σ_S = 50 МПа. Кроме того, было принято: эффективный размер микроструктурного трещинопорождающего дефекта d_* = 0,1 см; радиус скважины r_k= 10 см. Расчеты проведены при трех значениях наибольшей компоненты горизонтальных напряжений σ_1^0: 25; 50; 75 Мпа. Рассматривались два случая: а) давление в трещине постоянно и равно давлению жидкости в скважине p_k ; б) давление линейно падает по длине трещины и в конце трещины в два раза ниже, чем в скважине.

Полученные зависимости приведенной полудлины равновесной трещины λ от отношения давления жидкости в скважине к наименьшему горизонтальному напряжению p_k/σ_3^0 приведены на рис. 4.7 и 4.8. На рис. 4.7 изображены кривые для случая равномерного распределения давления жидкости в трещине. Сплошными линиями построены зависимости при учете микроструктурного члена в (4.5), который отражает особенности отрывного разрушения крупнопористой породы при ее неравномерном сжатии и влияние компоненты наибольшего напряжения σ_1^0 . Штриховыми линиями построены зависимости без учета микроструктурного члена.

Из рисунка следует, что главная компонента природных напряжений σ_1^0 играет большую роль в том случае, когда разность $\sigma_1^0 - p_0$ превышает прочность породы на одноосное сжатие σ_S. В этом случае рост протяженной трещины гидроразрыва возможен при давлении жидкости, не превышающем боковое горное давление σ_3^0. Это важный качественный результат. Расчеты показывают, что трещина гидроразрыва при этом может быть протяженной, но почти закрытой (закрытой по внешнему виду, но про-

Рис. 4.7. Зависимости приведенной полудлины трещины гидроразрыва от приведенного давления жидкости в скважине. Случай равномерного давления жидкости в трещине (пояснение в тексте)



пускающей жидкость). Рост трещины должен быть устойчивым и квазистатическим (трещина должна немного подрастать по мере повышения давления жидкости).

Если разность $\sigma_1^0 - p_0$ меньше прочности породы, то развитие протяженной трещины может быть правдиво описано и без учета микрострукутрного члена в (4.5).

Зависимость $\lambda = \lambda\,(p_k / \sigma_3^0)$ в случае, когда давление жидкости в трещине линейно изменяется по длине, показана на рис. 4.8.

Сплошные линии построены с учетом, а штриховые – без учета микроструктурного члена. Протяженная трещина гидроразрыва, превыша-

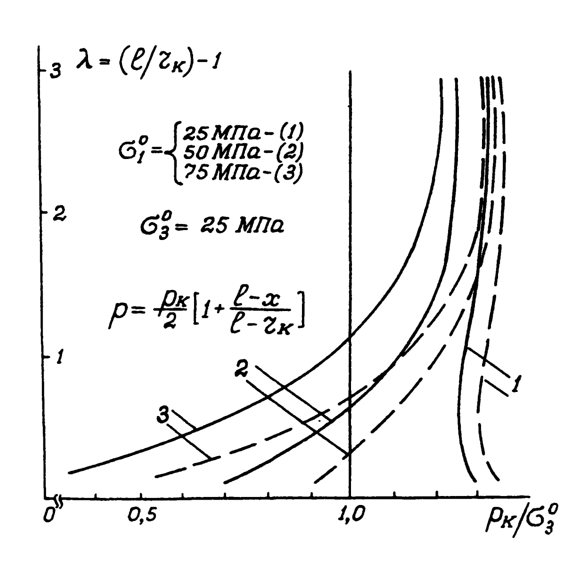


Рис. 4.8. Зависимости приведенной полудлины трещины гидроразрыва от приведенного давления жидкости в скважине. Случай линейного падения давления жидкости в трещине

ющая первые метры, может появиться, если давление жидкости в скважине больше напряжения σ_3^0 в 1,4 раза в условиях "гидростатичности" природного поля напряжений ($\sigma_1^0 = \sigma_3^0$) и в 1,3 раза в условиях неравнокомпонентного поля.

Если давление жидкости в трещине линейно падает по длине, то трещина гидроразрыва развивается устойчиво по мере повышения давления жидкости в скважине. Неустойчивый режим развития возможен только для коротких трещин при гидростатичности природного поля напряжений. Таким образом, учет микроструктуры в этом случае практически не вносит существенных качественных изменений в известные представления о развитии трещины. Различие в оценке развития трещины может быть только количественным. Оно тем больше, чем выше значение напряжения σ_1^0.

4.3.5. *Гидрорасслоение массива горных пород.* В гл.1 приведены данные шахтных наблюдений о наведенной трещиноватости массива вблизи обнажений пород в глубоких выработках. Один из главных выводов наблюдений состоял в том, что в условиях сильно выраженной неравнокомпонентности действующих в массиве напряжений ($\sigma_1^0 >> \sigma_3^0$) возможно образование закрытых и близкорасположенных макротрещин отрыва. Разработки гл.3 позволили сделать такое заключение в отношении газоносных пород.

Оценка настоящего параграфа дает основание сделать предположение о возможности образования близкорасположенных закрытых трещин отрыва в случае, когда фактором, способствующим развитию трещин, является жидкость. Действительно сплошная кривая *3* на рис.4.7 описывает развитие в массиве внешне закрытой, но пропускающей жидкость трещины гидроразрыва (при этом давление жидкости меньше горного). Отметим также, что в проведенных расчетах использовалась поровая модель макротрещины, которая в меньшей степени подходит для описания закрытых трещин, чем микротрещинная модель. Предполагалось, что порода является непроницаемой. Это также является неблагоприятным фактором. В хорошо проницаемой породе, для которой применима микротрещинная модель, образование закрытых трещин гидроразрыва реально при менее жестких требованиях к соотношению горного давления и прочности породы.

Закрытость трещины означает лишь наличие механического контакта берегов трещины. В микронеоднородной породе контакт осуществляться не по всей поверхности берегов, а по отдельным

точкам, так что в трещину, несмотря на ее "закрытость", под давлением может проникать жидкость.

Давление проникающей жидкости должно противодействовать боковому горному давлению, и, как следствие, минеральный скелет вблизи трещины должен разгружается от бокового горного давления (особенно в хорошо проницаемой породе). Поэтому трещина в минеральном скелете может расти только под действием горного давления, направленного вдоль трещины, подобно тому, как развивается трещина отрыва в условиях одноосного сжатия. Вблизи закрытой трещины складываются благоприятные условия для развития второй закрытой трещины, а затем и других закрытых трещин отрыва, ориентированных в том же направлении, что и первая.

Таким образом, в условиях сильно неравнокомпонентного природного поля напряжений, когда реализуются условия для развития внешне закрытой трещины гидроразрыва, вполне вероятно образование не одной трещины гидроразрыва, а нескольких закрытых трещин. Эти трещины сформируют зону трещиноватости, которую можно назвать зоной скрытого гидрорасслоения массива горных пород.

Зона гидрорасслоения должна обладать высокой наведенной проницаемостью. Фактически зона гидрорасслоения должна проявляться в массиве как зона сильной анизотропной проницаемости. Кроме того, она должна иметь большую поглотительную способность в отношении находящейся в скважине жидкости. Вероятно, именно с образованием зон скрытого гидрорасслоения массива может быть связано исчезновение бурового раствора в тех случаях, когда его давление в скважине меньше природного горного.

Действительно, если давление бурового раствора ниже горного, то трещина гидроразрыва не может быть раскрытой и объем поглощаемого бурового раствора не может быть большим. Большой объем поглощаемого раствора в слабопроницаемых породах можно объяснить лишь объемным трещинообразованием в массиве пород.

Вывод о возможности образования зоны скрытого гидрорасслоения массива горных пород является чисто теоретическим. Однако по логике исследования образование зоны скрытого гидрорасслоения в массиве реально в той же степени, что и образование зоны наведенных закрытых трещин вблизи глубоких горных выработок, а последнее является уже установленным фактом.

4.3.6. *Основные выводы*. Учет микроструктурных особенностей породы в отрывном разрушении позволяет сделать следующие

аналитические выводы в отношении гидроразрыва монолитны массивов хрупких пород.

1. Неравнокомпонентность главных природных напряжени является благоприятным условием для образования трещин гидро разрыва. При очень высокой неравнокомпонентности природны напряжений гидроразрыв может произойти даже в том случае, ког да давление жидкости в скважине меньше горного давления. Че выше разница в значениях наибольшей и наименьшей компонент природных напряжений, тем при более низком давлении жидкости возможен гидроразрыв. Трещина гидроразрыва может превышать несколько метров в длину, но при этом выглядеть закрытой.

2. В условиях сильной неравнокомпонентности главных природных напряжений в массиве возможно образование не одной трещины гидроразрыва, а нескольких параллельных закрытых трещин, ориентированных перпендикулярно направлению минимального сжатия. Эти трещины могут образовать скрытую зону гидрорасслоения массива, которая будет иметь большую поглотительную способность для жидкости, находящейся в скважине.

Глава 5.
МЕХАНИЗМ ЗОНАЛЬНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

5.1. Зональная дезинтеграция вблизи забоя очистной выработки

При экспериментальном исследовании состояния массива горных пород вокруг глубоких одиночных выработок установлена необычная закономерность в структуре наведенной трещиноватости – зональная дезинтеграция горных пород. В [95,96,130] подробно описана зональная дезинтеграция пород на руднике Октябрьский. Некоторые данные были приведены в п 1.2.

Зональная дезинтеграция пород регистрируется также впереди забоя очистных выработок при разработке глубоких рудных жил. На рис.1 показаны зоны дезинтеграции пород для этого случая. Подобные рисунки встречаются в работах южно-африканских ученых по проблемам горного давления начиная с работ G.R Adams и A.J.Jager [133,134].

Рис. 5.1, заимствованный из [167], также дает представление о наведенной трещиноватости впереди забоя.

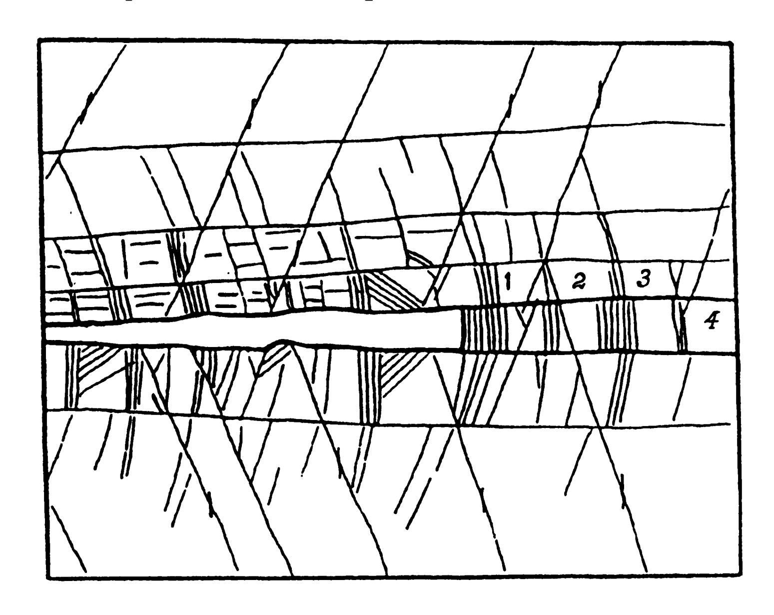


Рис. 5.1. Зоны дезинтеграции массива горных пород (*1*, *2*, *3*, *4*) впереди забоя очистной выработки

Из этого рисунка видно, что в рудной жиле при удалении от забоя зона сильного отрыного разрушения *1* (зона дезинтеграции) сменяется зоной явно более слабого разрушения. Затем снова следует зона интенсивного отрывного разрушения *2* (вторая зона дезинтеграции), которая также сменяется зоной более слабого разрушения. Далее снова расположена зона интенсивного отрывного разрушения *3* (третья зона дезинтеграции). Наконец, просматривается еще одна зона дезинтеграции *4*.

Таким образом, вблизи забоя глубокой очистной выработки интенсивность наведенной трещиноватости отрывного типа изменяется как бы по синусоиде, хотя по сложившимся теоретическим представлениям интенсивность наведенной трещиноватости должна монотонно убывать при удалении от забоя. Подобный вывод в отношении "волновой" картины распределения напряжений вблизи очистной выработки сделан в [126].

Вопросы теории зональной дезинтеграции обсуждались в [115,128]. Эта глава также посвящена теоретическим исследованиям механизма зональной дезинтеграции. Здесь используются некоторые выводы и разработки предыдущих глав.

Рассмотрим возможный механизм образования периодической структуры отрывного разрушения горных пород вблизи забоя плоской выработки, характерной для разработки маломощного пласта. С этой целью исследуем сначала устойчивость деформирования краевой части пласта вблизи забоя выработки.

5.2. Запредельное деформирование краевой части пласта

5.2.1. *Запредельное деформирование горных пород.* Как отмечалось в п.1.1, при испытании на сжатие образцы хрупкой породы после достижения предельной прочности и соответствующей предельной деформации могут деформироваться с ниспадающей ветвью диаграммы "нагрузка–деформация". Это возможно в режиме жесткого нагружения, когда образец и испытательная машина образуют конструкцию, которая не дает деформациям развиваться неограничено. В запредельной стадии неустойчивое деформирование разрушающегося образца должно сдерживаться, например, компенсатором или при помощи действия сервоуправляющего устройства.

Сопоставляя результаты опытов, проведенных различными исследователями запредельного состояния образцов, например [34,111,160,184], можно заключить, что особенности нагружающего устройства и система нагружения могут существенно влиять на вид кривой запредельного деформирования. Поэтому кривую запредельного деформирования следует рассматривать не как характе-

ристику поведения конкретной породы, а как характеристику деформирования некоторого объема разрушающейся породы в определенной конструкции.

В природе конструкция, обеспечивающая жесткий режим нагружения некоторого объема горной породы, может образоваться естественным образом. В простейшем случае эта геоконструкция состоит из двух частей: части массива пород, которая находится в состоянии запредельного деформирования с ниспадающей ветвью зависимости "нагрузка–деформация", и области массива, деформирующейся упруго. Например, частью массива, находящейся в запредельном состоянии, могут быть целик, краевая часть пласта, породная неоднородность.

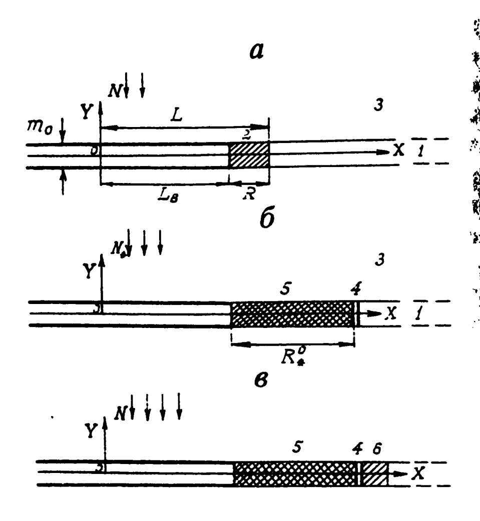
Можно рассматривать природные геоконструкции, в которых граница, разделяющая область запредельного деформирования и упругую область, зафиксирована в пространстве. Таковыми, например, являются геоконструкции типа "рудный целик + вмещающая порода", " породная неоднородность + вмещающая порода". Граница неоднородности в этих конструкциях может быть естественной границей области запредельного деформирования. Деформирование некоторых таких геоконструкций рассмотрено в работе [99].

В наших целях целесообразно рассмотреть геоконструкцию, в которой область запредельного деформирования при нагружении конструкции увеличивается и граница, разделяющая ее части, смещается. Здесь, говоря о геоконструкции, имеем ввиду следующее: 1) в массиве пород можно выделить части, реакция которых на нагрузку различается качественно; 2) эти части воспринимают внешнюю нагрузку совокупно; 3) взаимодействие частей выражается условием непрерывности нормальных напряжений на их общей границе, условие непрерывности смещений на некоторой части границы может не выполняться; 4) при нагружении геоконструкции одна из частей может увеличиваться за счет другой (при этом граница, разделяющая части геоконструкции, смещается в пространстве).

Ответ на вопрос, при каком условии нарушается равновесный, квазистатический процесс деформирования геоконструкции, содержащей область запредельных деформаций, можно получить из решения соответствующей задачи. В этой связи в [89] рассмотрена модельная задача, решение которой воспроизводится ниже.

5.2.2. *Модельная задача о плоской выработке.* Рассмотрим деформирование тонкого горизонтального пласта и вмещающих пород вблизи выработки (рис. 5.2,а). Считаем для простоты, что сцепление пласта с вмещающими породами отсутствует. При обра-

Рис. 5.2. Схемы к задаче о деформировании краевой части пласта: а – преддинамическое деформирование; б –образование “ложного” забоя; в – постдинамическое деформирование



зовании выработки упругий пласт *1* сдавливается вмещающей породой *3* неравномерно. Вследствие высоких напряжений в пласте его краевая часть *2* должна перейти в состояние запредельного деформирования.

Геоконструкция, которая образуется при этом из вмещающей породы, пласта и его краевой части, в определенном смысле подобна конструкции жесткого пресса с компенсатором. Роль нагружающего устройства выполняет вмещающая порода, компенсатором является упругая часть пласта. Допуская, что рассматриваемая геоконструкция имеет равновесный характер деформирования в некотором диапазоне возрастания горного давления во вмещающей породе (или при увеличении протяженности выработанного пространства), найдем условие, при котором равновесие нарушается.

Для решения задачи целесообразно раздельно рассматривать составные части геоконструкции. Условием совместного деформирования частей является непрерывность нормальных напряжений и смещений на контакте краевой части пласта и вмещающей породы.

В задаче считаем, что толщина пласта m_0 много меньше протяженности выработки $2L_B$. Ось декартовой системы координат ОХ расположим вдоль продольной оси выработки. Оси ОХ и ОУ являются осями симметрии. Считаем, что выполняются условия плоской деформации, а вмещающая порода и пласт до начала разрушения являются однородными упругими средами с равными модулями упругости и коэффициентами Пуассона.

Рассматриваем случай, когда угол трения на контакте пласта и вмещающей породы мал. Поэтому для простоты принимаем, что касательные напряжения на контакте пласта и вмещающей породы равны нулю. Следовательно, в рассматриваемом тонком пласте выполняется соотношение $\sigma_x = 0$.

Вдали от выработки заданы главные компоненты напряжений

$$\sigma_x = \chi \gamma H \ , \qquad \sigma_y = \gamma H \ . \qquad (5.1)$$

Напряжение сжатия положительно, χ – постоянная (коэффициент бокового распора). Обозначим для удобства $\gamma H = N$.

Запредельная краевая часть пласта. Здесь вертикальное смещение v линии контакта краевой части с вмещающими породами определяется преимущественно неупругими (запредельными) деформациями пласта. Считаем, что это смещение и нагрузка на краевую часть со стороны вмещающей породы связаны простейшей зависимостью, график которой состоит из двух линейных участков – наклонного и горизонтального. Обозначим: T_N – нормальная нагрузка на краевую часть, σ_S – предел прочности породы в пласте на одноосное сжатие, M – условный модуль запредельного деформирования, соответствующий линеаризованной диаграмме “нагрузка–деформация” для краевой части. Тогда для краевой части пласта можно записать

$$T_N(x) = \sigma_S - 2M\mathrm{v}(x) / m_0 \ . \qquad (5.2)$$

Соотношение (5.2) означает, если деформация краевой части пласта увеличивается, то нагрузка на нее уменьшается. В этом смысле соотношение (5.2) соответствует результатам экспериментов по запредельному сжатию образцов на жестких прессах.

Если нагрузка на краевую часть T_N в какой-либо точке достигает критического значения σ^*

$$T_N = \sigma^* \ , \qquad (5.3)$$

то дальнейшее ее снижение в этой точке с развитием смещений не происходит. Условие (5.3) соответствует горизонтальному (устойчивому) участку запредельного деформирования, о существовании которого свидетельствуют данные экспериментов. Критическое значение σ^* будем называть остаточной прочностью краевой части на сжатие.

Область упругого деформирования. Вмещающая порода вместе с большей частью пласта являются областью упругого деформирования. Математически мы будем отдельно рассматривать эту область как неограниченную плоскость с разрезом. Часть этого разреза, соответствующая выработке, свободна от напряжений. На части, соответствующей краевой части пласта, задана нагрузка T_N . Такой прием дает возможность использовать в анализе напряженно-деформированного состояния области упругого деформирования математический аппарат механики трещин.

Длину соответствующего разреза обозначим $2L$; $2L = 2(L_B+R)$, где R – длина краевой части пласта.

Таким образом, в задаче расчета напряженно-деформированного состояния упругой области считаем, что часть разреза, соответствующая выработке, свободна от напряжений

$$\sigma_y(x,0) = 0, \qquad |x| \le L_B, \qquad (5.4)$$

а концевые части разреза, соответствующие краевым частям пласта, нагружены нормальным напряжением

$$\sigma_y(x,0) = T_N(x), \qquad L_B < |x| < L_B + R. \qquad (5.5)$$

Касательные напряжения на оси OX равны нулю. На бесконечности действует нагрузка (5.1).

В качестве дополнительного условия примем конечность напряжений в концевых точках разреза, которое эквивалентно условию плавного смыкания берегов разреза в этих точках. В геомеханическом отношении это условие отражает плавный изгиб линии контакта пласта и вмещающей породы [8]. Решаем задачу в предположении малости длины краевой части пласта R по сравнению с длиной разреза, т.е. $L - L_B = R << L$.

При условии конечности напряжений асимптотическое представление смещения верхнего берега разреза вблизи концевой точки условного разреза имеет вид

$$\mathrm{v}(x) = B\,(L - |x|)^{3/2}, \qquad (5.6)$$

где B – параметр задачи ($B > 0$; смещение вниз верхнего берега разреза положительно).

Следует заметить, что асимптотика (5.6) верна на расстоянии, малом по сравнении со всеми линейными размерами задачи, включая R. Здесь эта асимптотика используется во всем диапазоне от L_B до L. Это одно из упрощений в задаче, позволяющее избежать громоздких вычислений. Оно не должно решающим образом повлиять на конечный результат исследования, которое направлено на выявление качественной стороны явления.

В исследовании зональной дезинтеграции решающим обстоятельством является проявление неустойчивости геоконструкции при ее нагружении до того момента, когда краевая часть пласта перейдет на режим запредельного деформирования с условием стабилизации (5.3). Поэтому сначала мы будем рассматривать такую ситуацию при нагружении пласта вблизи выработки, когда условие (5.3) еще не выполняется ни в одной точке краевой части. В этом случае в соотношении (5.5) значение T_N определяется только выражением (5.2).

С учетом этого замечания и условия совместного деформирования частей геоконструкции выражение (5.6) можно подставить в (5.2) и получить соотношение для напряжений, действующих в концевой части разреза

$T_N(x) = \sigma_S - 2MB(L - |x|)^{3/2}/m_0$.

Общее соотношение между нагрузкой на берегах разреза $g(x)$ и смещением берега $v(x)$ можно записать в виде [33]

$$v(x) = \pm \frac{4(1-\nu^2)}{\pi E} \int_{|x|}^{L} t(t^2 - x^2)^{-1/2} dt \int_0^t g(s)(t^2 - s^2)^{-1/2} ds \cdot \qquad (5.7)$$

В рассматриваемой задаче

$$g(x) = -N + [\sigma_S - 2MB(L - |x|)^{3/2}/m_0] H(|x| - L_B) .$$

Здесь $H(x)$ – функция Хевисайда. Произведя асимптотическое разложение (5.7) по $\xi = (L - x)/L$ при $L - x << L$, будем рассматривать лишь его первые члены, содержащие малые величины $\xi^{1/2}$ и $\xi^{3/2}$. Из условия конечности напряжений следует, что член разложения с $\xi^{1/2}$ должен быть равен нулю. Таким образом получаем одно уравнение, связывающее параметр задачи B и длину краевой части R .

При упрощенной оценке другое уравнение с этими параметрами можно получить из требования соответствия представления (5.6) и члена разложения (5.7), содержащего $\xi^{3/2}$. Решая систему уравнений, можно найти соотношение между длиной выработки $2L_B$ (или параметром горного давления N) и длиной краевой части R . Подчеркнем, что это соотношение не будет строгим, поскольку находится при многих упрощениях.

Далее целесообразно ввести в рассмотрение ζ – безразмерный параметр обобщенной нагрузки, отражающий влияние как длины выработки $2L_B$ ($\approx 2L$), так и горного давления N , а также ρ – безразмерный параметр длины краевой части

$$\zeta = (N/\sigma_S)(L_B/m_0)^{1/2} ,$$
$$\rho = 8(1-\nu^2)(R/m_0) . \qquad (5.8)$$

В этом случае приближенное выражение для ζ можно записать в виде

$$\zeta = 0{,}95\rho^{1/2}(1 - 3\rho/2)/(1-\rho) . \qquad (5.9)$$

Параметр задачи B определяется выражением

$$B = \sigma_S m_0 \rho / [MR^{3/2}(1-\rho)] .$$

5.3 Неустойчивость деформирования пласта

5.3.1. *Неустойчивость деформирования пласта.* На рис. 5.3 кривой АВС представлен график зависимости $\rho(\zeta)$. График показывает, что существует этап устойчивого деформирования геоконструкции (кривая АВ), при котором более высокой обобщенной нагрузке ζ (длине выработки L_B или горному давлению N) соответствует более протяженная краевая часть пласта. Существует и неустойчивое равновесное состояние геоконструкции (кривая ВС), которое, естественно, не может реализоваться на практике.

Критическую обобщенную нагрузку обозначим ζ_*. При этом значении равновесный, квазистатический процесс деформирования геоконструкции (пласта и вмещающей породы) должен смениться динамическим. Перемена режима деформирования на практике может ощущаться как динамическое проявление горного давления (горный удар).

Из теории устойчивости квазиравновесных систем (см., например [5]) можно заключить, что для рассматриваемой геоконструкции предельно равновесное состояние, которое в задаче является неустойчивым, определяется условием

$$d\zeta / d\rho = 0 . \tag{5.10}$$

Критическая обобщенная нагрузка ζ_* и критическое значение параметра ρ_* находятся из решения системы уравнений (5.8) и (5.10). Имеем $\zeta_* = 0{,}41$; $\rho_* = 0{,}33$. Искомое приближенное условие нарушения равновесного квазистатического процесса деформирования геоконструкции в физических величинах записывается в виде

$$(N_* / \sigma_S)(L_B / m_0)^{1/2}\left[\pi \left(1-\nu^2\right)M / E\right]^{1/2} = 0{,}87 . \tag{5.11}$$

Критическая длина краевой части определяется выражением

$$R_* = \pi \; E m_0\left[8\left(1-\nu^2\right)M\right]^{-1} . \tag{5.12}$$

Поскольку мощность пласта m_0 значительно меньше длины выработки L_B, нетрудно заключить из (5.11), что для нарушения равновесия необходимо выполнение соотношения

$$N_* M^{1/2} \ll \sigma_S E^{1/2} . \tag{5.13}$$

Выполнение соотношения (5.13) гарантирует, что потеря устойчивости геоконструкции с ростом нагрузки произойдет раньше, чем какой-либо участок краевой части пласта перейдет в режим устойчивого деформирования с условием (5.3).

Заметим, что потеря устойчивости геоконструкции с ростом нагрузки является следствием процесса запредельного деформиро-

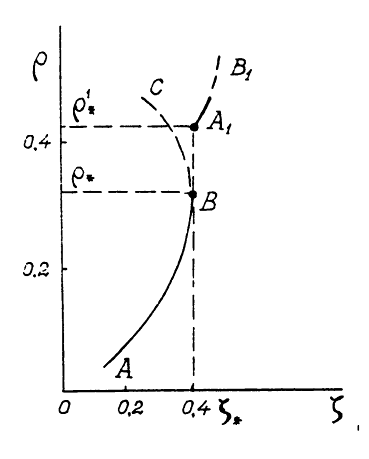


Рис. 5.3. Зависимость параметра длины "запредельной" краевой части от обобщенной нагрузки

вания краевой части пласта, а не обусловлена сделанными упрощениями в решении. В [86] возможность потери устойчивости деформирования геоконструкции, содержащей область запредельного, установлена для выработки кругового поперечного сечения при отсутствии тех упрощений в решении, которые сделаны в этой работе.

5.3.2. *Постдинамическое состояние пласта.* Как выше отмечено, если при нагружении геоконструкции достигается неустойчивое состояние, то квазистатический процесс деформирования должен смениться динамическим. Последний может быть описан только в рамках динамической задачи. В статической задаче можно исследовать постдинамическое (послеударное) состояние пласта и вмещающей породы. Причем в этой задаче исходные условия должны отражать результат динамического деформирования и разрушения пласта при его переходе от преддинамического состояния к постдинамическому.

Результат динамического перехода спрогнозировать теоретически трудно. Поэтому целесообразно рассматривать начальное постдинамическое состояние, опираясь, главным образом, на данные соответствующих натурных наблюдений об изменении наведенной трещиноватости пород вокруг выработок. Кроме того, следует учитывать закономерности изменения состояния квазиравновесных систем при потере устойчивости, описанные в [5]. Например, из вида кривой равновесия ABC (см.рис.5.3), можно сделать вывод, что в рамках рассмотренной геоконструкции постдинамическое состояние описать нельзя. Следовательно, после динамического процесса необходимо рассматривать новую геоконструкцию, способную противостоять более высоким нагрузкам [88].

Исходя из данных натурных наблюдений, можно предположить, что выполняются следующие условия в отношении устойчивого постдинамического состояния пласта.

1. Образовалась крупная магистральная трещина отрыва *4* (рис.5.2,б), отделившая от пласта некоторую его часть *5*. (В [130]

подобная магистральная трещина получила название "ложный контур" ("ложный забой") выработки.

2. В отделившейся части пласта изменилось напряженно-деформированное состояние (как результат изменения общей трещиноватости краевой части при динамическом процессе). Эта часть перешла в устойчивое состояние, описываемое соотношением (5.3), которое отвечает горизонтальному участку диаграммы "нагрузка–деформация".

3. В начальном постдинамическом состоянии за отделившейся частью пласта находится область упругого деформирования, напряжения в которой ограничены.

Таким образом, мы полагаем, что в начальный момент постдинамического состояния в пласте имеются только области устойчивого деформирования. Условием взаимодействия этих областей является непрерывность нормальных напряжений на ложном контуре *4* и вдоль других границ. Нормальное смещение на контакте пласта и вмещающей породы непрерывно, однако смещение по оси OX на ложном контуре имеет скачок. Этот скачок обусловлен неровностью (шероховатостью) берегов магистральной трещины отрыва.

Возникновение скачка в смещениях на ложном контуре *4* является ключевым элементом изложения. Это допускает принятие на ложном контуре тех условий, которые использованы в задаче о развитии трещин отрыва вблизи свободной (или нормально нагруженной) поверхности. В следующем параграфе решение этой задачи используется для объяснения структуры трещиноватости.

Обозначим R_*^0 – длину отслоившейся части пласта. Эту длину можно найти, используя условие 3.

Напряженное состояние отделившейся части пласта описывается соотношениями $\sigma_x(x,0) = 0$; $\sigma_y(x,0) = \sigma^*$. Последнее следует из (5.3). В этом случае условие ограниченности напряжений для тонкого разреза позволяет получить (см. [98])

$$R_*^0 = (\pi N_* / \sigma^*)^2 L_B / 8 .$$

С учетом (5.11) и (5.12) это дает

$$R_*^0 / R_* = (0{,}87 \sigma_S / \sigma^*)^2 . \qquad (5.14)$$

Поскольку σ_S значительно больше σ^*, то можно заключить, что $R_*^0 > R_*$. Следовательно, при динамическом процессе деформирования и разрушения геоконструкции часть пласта длиной $R_*^0 - R_*$, являвшаяся до начала динамического процесса упругой,

переходит в состояние устойчивого запредельного деформирования, "проскакивая" деформирование с ниспадающей ветвью диаграммы "нагрузка–деформация". Это примечательная особенность динамического перехода.

При последующем нагружении пласта (для обобщенной нагрузки $\zeta > \zeta_*$) отделившаяся часть пласта всегда должна деформироваться устойчиво, а за ложным контуром может образоваться новая область запредельного деформирования *б* (см. рис. 5.2,в), описываемая ниспадающей ветвью диаграммы. Это возможно, если вмещающая порода и пласт сформируют новую природную геоконструкцию, способную реализовать жесткий режим нагружения области *б*. Это несколько более сложная геоконструкция, чем была рассмотрена ранее. Она состоит из следующих частей: отделившейся части пласта, непосредственно прилегающей к выработке, области запредельного деформирования с ниспадающей ветвью диаграммы "нагрузка–деформация", упругой части пласта и вмещающей породы.

Решая задачу для нагрузки $\zeta > \zeta_*$, можно построить вторую ветвь зависимости "обобщенная нагрузка – длина краевой части" (см. рис.5.3, кривая A_1B_1) и найти критическое значение обобщенной нагрузки ζ_{**}, при которой снова выполняется условие предельно равновесного состояния (5.10). При этом квазистатический процесс деформирования новой геоконструкции должен смениться динамическим процессом, в результате которого должна отделиться и перейти в устойчивое состояние другая часть пласта.

Далее можно рассмотреть второе постдинамическое состояние пласта, а затем последующее нагружение $\zeta > \zeta_{**}$ новой геоконструкции с двумя отделившимися частями. Можно рассмотреть третий и последующий циклы устойчивого деформирования и динамического разрушения пласта.

Механизм квазистатического, плавного деформирования вмещающей породы и пласта с динамическими (скачкообразными) качественными перестройками должен действовать, пока в глубине пласта выполняются условия для деформирования некоторой части пласта с ниспадающей ветвью зависимости "нагрузка–деформация". Кроме того, необходимым условием неустойчивого деформирования пласта является соотношение (5.13).

Таким образом, в результате квазистатического роста горного давления (или увеличения протяженности выработанного пространства) в пласте могут последовательно образоваться несколько ложных контуров, отслаивающих определенные части пласта.

Каждый из этих контуров, как далее показано, изменяет вблизи себя структуру трещиноватости.

5.4. Структура наведенной трещиноватости

В п. 2.8 обсуждались особенности запредельного деформирования области массива в масштабе выработки. Утверждения, сделанные в том подразделе, а также выводы п.п. 2.6 и 2.7 используем здесь для объяснения структуры наведенной трещиноватости.

Как отмечалось, развитие необратимых деформаций в области запредельного деформирования может быть объяснено развитием в ней новых трещин. Следовательно, и в рассматриваемом случае развитие запредельных деформаций в краевой части пласта связано с ростом трещин.

После окончания динамического процесса состояние краевой части пласта описывается условием (5.3). Однако это условие (в отличие от опытов с образцами) не означает потерю связанности породы. Вдали от от обнажения закрытые трещины могут быть расположены достаточно близко друг к другу, но поскольку они ориентированы в одном направлении, то не должны пересекаться. Следовательно, вдали от обнажения область запредельного деформирования пласта и на ниспадающем, и на горизонтальном участках может содержать трещины, но в целом эта область не должна терять связанность и "интегрированность". Зона дезинтеграции пласта может возникнуть только вблизи обнажения пород.

Действительно, у свежего обнажения пород, как следует из п.п. 2.6.4 и 4.1, структура наведенной трещиноватости должна быть отлична от той, которая формируется вдали от обнажения. В непосредственной близости от обнажения макротрещины отрыва искривлены. Поскольку они к тому же могут иметь разную длину, то с неизбежностью должны соединяться. Картина наведенной трещиноватости у обнажения показана на рис. 4.1.

Образующиеся отдельности в сечении имеют вогнуто-выпуклую форму. Максимальный поперечный размер отдельностей может варьироваться от сантиметров до десятков сантиметров. Из соотношений (4.1) и (2.26) следует, что верхний предел зависит от трещиностойкости породы и параметра ее микроструктуры.

Подобная зона несвязанности (дезинтеграции) должна сформироваться и у ложного забоя выработки при его появлении. Это следует из того, что ложный забой математически допустимо рассматривать как нормально нагруженную поверхность обнажения пород, а в п.2.6.4 было установлено, что небольшая нормальная нагрузка на поверхности обнажения пород не может предотвратить искривление трещин вблизи этой поверхности. Мощность

зоны искривленных трещин, очевидно, не должна увеличиваться при последующих процессах деформации пласта.

В свете вышеизложенного сделаем замечание о структуре наведенной трещиноватости отрывного типа, которая показана на рис. 1 и 5.1. Эта структура установлена в результате визуальных наблюдений стенок скважин, пробуренных в забое. Очевидно, что таким способом кривизну трещин в зоне дезинтеграции выявить трудно. Образующиеся отдельности имеют вид вытянутых пластин, длина которых более чем на порядок превосходит поперечный размер. Вероятно поэтому в зарисовках трещиноватости показано лишь сгущение трещин отрыва вблизи ложных забоев.

В отношении отсутствия трещин в областях, расположенных между зонами дезинтеграции, следует сказать, что это отсутствие скорее всего кажущееся. Количество трещин в этих областях должно быть существенно ниже, чем в зоне дезинтеграции. Очевидно, это дало основание представлять эти области как ненарушенные.

В заключение заметим, что зона искривленных трещин у ложного забоя (зона дезинтеграции) имеет иные деформационные свойства, чем область связанного массива. Это обстоятельство, вообще говоря, должно учитываться в анализе напряженного состояния и устойчивости пласта вблизи выработки. Здесь это не сделано ради упрощения математических выкладок.

5.5. Основные выводы.

Из проведенного выше исследования следует, что явление зональной дезинтеграции представляет собой чередование в области запредельного деформирования зон несвязанного и связанного массива. Внутренние зоны несвязанного массива (зоны дезинтеграции), в которых наведенные трещины искривлены и соединяются между собой, расположены у ложных забоев выработки, отделяющих крупные отслоившиеся части массива.

Появление зоны дезинтеграции происходит в том случае, когда массив горных пород в ходе квазистатического деформирования при росте внешней нагрузки достигает состояния неустойчивости и, динамически разрушаясь, переходит к новой структуре нарушенности, которая обеспечивает устойчивость деформирования массива в некотором диапазоне последующей нагрузки.

В результате крупных отслоений и появления ложных забоев в массиве образуются области автономного деформирования. Поэтому такой массив горных пород вблизи выработки следует рассматривать как составную геоконструкцию при решении многих практических вопросов, например, взрывного разрушения или крепления выработок.

Глава 6.
ПРИМЕР УПРАВЛЕНИЯ ОТРЫВНЫМ РАЗРУШЕНИЕМ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД. МЕТОД ГИДРОГАЗОИМПУЛЬСНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПОРИСТОЙ ПОРОДЫ

6.1. Гидрогазоимпульсное воздействие на массив горных пород

В качестве примера приложения теории отрывного разрушения сжатых пород к решению практических проблем рассмотрим метод управляемого разрушения пористых ископаемых при скважинной гидродобыче.

Скважинная гидродобыча (СГД) является перспективным способом подземной разработки месторождений пористых, рыхлых и легко диспергируемых полезных ископаемых. Сущность этого способа добычи заключается во вскрытии месторождения скважинами, разрушении массива в подземной камере (обычно напорной струей воды с помощью скважинного гидромонитора), переводе разрушенной массы в гидросмесь и транспортировке смеси через скважину на поверхность [4,6].

Опыт скважинной гидродобычи показал ее эффективность при разработке месторождений, расположенных на глубинах менее 100 м. Применение СГД при разработке более глубоких месторождений вызывает ряд проблем, из которых важное значение имеют проблемы разрушения массива и повышения его подвижности вблизи добычной скважины. Как показал опыт скважинной гидродобычи железных руд КМА на глубинах более 500 м, эффективность гидроразмыва в обводненной среде на этой глубине невелика даже при разработке руд с прочностью менее 4 МПа.

Таким образом, перспектива применения СГД на больших глубинах зависит от разработки принципиально нового метода разрушения массива горных пород в скважинах. Такой метод был предложен сотрудниками Института проблем комплексного освоения недр и Института проблем механики (ИПМ) РАН [50] для разрушения пористых полезных ископаемых. Он обобщает метод гидроимпульсного разрушения, разработанный в Институте геотехнической механики (ИГТМ) АН Украины [46,78] для разрушения газоносных углей в шахтных условиях. Поэтому целесообразно сначала остановиться на гидроимпульсном методе разрушения ИГТМ, успешно прошедшем опытно-промышленные испытания.

Сущность метода ИГТМ заключается в бурении скважины до пласта из полевой выработки, находящейся ниже пласта угля, обсадке скважины трубами с цементацией затрубного пространства, нагнетании воды (или воды и газа при недостаточной газонос-

ности угля) до давления, не превышающего геостатическое, резком сбросе давления, приводящем к разрушению некоторого слоя угля и выносу его в виде пульпы по этой же скважине. После прекращения разрушения и выноса угля нагнетание воды и сброс давления повторяются.

Эффективность добычи гидроимпульсным методом сильно зависит от наличия природного газа в угле. Природный газ оказывает решающее влияние на весь технологический процесс перевода угля в разрушенное и подвижное состояние: при действии газа создается волна послойного отрыва в угле, за фронтом которой возникает движение разрушенной массы. Гидроимпульсное воздействие на пласт угля фактически только провоцирует действие природного газа.

Идея сброса давления закачиваемой воды в скважине с целью инициирования отрыва является перспективной для СГД на больших глубинах. Поэтому в ИПКОН и ИПМ она получила дальнейшее развитие для разрушения сильно обводненных пород, а также пород, лишенных природного газа. В новом методе усилены такие важные элементы, как растворение газа в рабочем агенте (т.е. воде, закачиваемой в массив) и фильтрация рабочего агента с растворенным газом в массив. В целях подчеркивания особой роли растворенного газа новый метод скважинного разрушения пород получил название гидрогазоимпульсный метод.

Сущность гидрогазоимпульсного метода разрушения пористых пород заключается в следующем. С поверхности через скважину в добычную камеру под давлением в течение определенного промежутка времени нагнетается рабочий агент – вода, содержащая растворенный газ (воздух или углекислоту). Вследствие фильтрации агент проникает в поровое пространство окружающего массива полезного ископаемого.

Газ находится в растворенном состоянии. При резком сбросе давления воды в скважине в массиве происходит динамическое перераспределение напряжений вблизи скважины (камеры): уменьшаются радиальные и увеличиваются окружные напряжения. Вследствие неравномерного сжатия породы и сохраняющегося высокого давления воды в порах из пор начинают прорастать микротрещины отрыва. Рост микротрещин ведет к увеличению объема трещинопор и падению в них давления порового заполнителя. Поэтому в порах начинает происходить выделение свободного газа.

Выделяющийся свободный газ поддерживает дальнейший рост микротрещин, а это в свою очередь приводит к дальнейшему падению газожидкостной смеси в порах и более интенсивному выходу из воды растворенного газа. Соединение микротрещин отрыва формирует макротрещину отрыва. Образование макротрещин

означает начало процесса макроразрушения породы – отслоения тонких кусочков от массива. Отслоившаяся, разрушенная масса перемещается выделившимся свободным газом к добычной скважине.

После подъема отслоившейся массы нагнетание воды с растворенным газом повторяется снова, и снова производится сброс давления. И так далее. Таким образом при этом методе скважинного гидрогазоимпульсного воздействия на массив имеет место: 1) разрушение части массива вблизи добычной камеры в каждом цикле "нагнетание рабочего агента – резкий сброс давления" ; 2) повышение подвижности массива вблизи добычной скважины в результате периодического динамического воздействия на массив. В силу этих причин скважинная гидродобыча пористых ископаемых с их гидрогазоимпульсным разрушением может найти применение в тех случаях, когда гидроразмыв породы затруднен.

Теоретическая разработка метода требует совместного решения нескольких задач: фильтрации в массив воды с растворенным газом и обратного движения воды с растворенным или свободным газом при сбросе давления в скважине, а также разрушения породы вблизи добычной камеры.

Расчеты фильтрации рабочего агента в массив и движения газожидкостной смеси из массива являются сложными задачами о многофазном течении. Они описаны в работе [50], где раскрыты некоторые интересные особенности такого течения, например возможность преждевременного выхода растворенного газа и образование воздушной пробки, препятствующей дальнейшему проникновению воды.

Не рассматривая в деталях многие геомеханические аспекты гидрогазоимпульсного воздействия на массив, остановимся в этой главе только на вопросах разрушения породы при технологическом сбросе давления воды в скважине.

6.2. Определение радиуса области отслоения породы

Используя некоторые разработки глав 2 и 3 в отношении развития микро– и макротрещин в крупнопористой породе, оценим радиус области отслоения породы при технологическом сбросе давления в скважине.

Для проведения расчетов примем условия осевой симметрии. Введем цилиндрическую систему координат r , θ , z . Ось OZ направлена вдоль оси симметрии цилиндрической добычной камеры радиуса r_k и соосной с ней скважины (рис.6.1,а). Горную породу рассматриваем как упругую среду с достаточно удаленными друг от друга крупными порами. Крупные поры с радиусом более

0,1 мм способны порождать микротрещины отрыва.

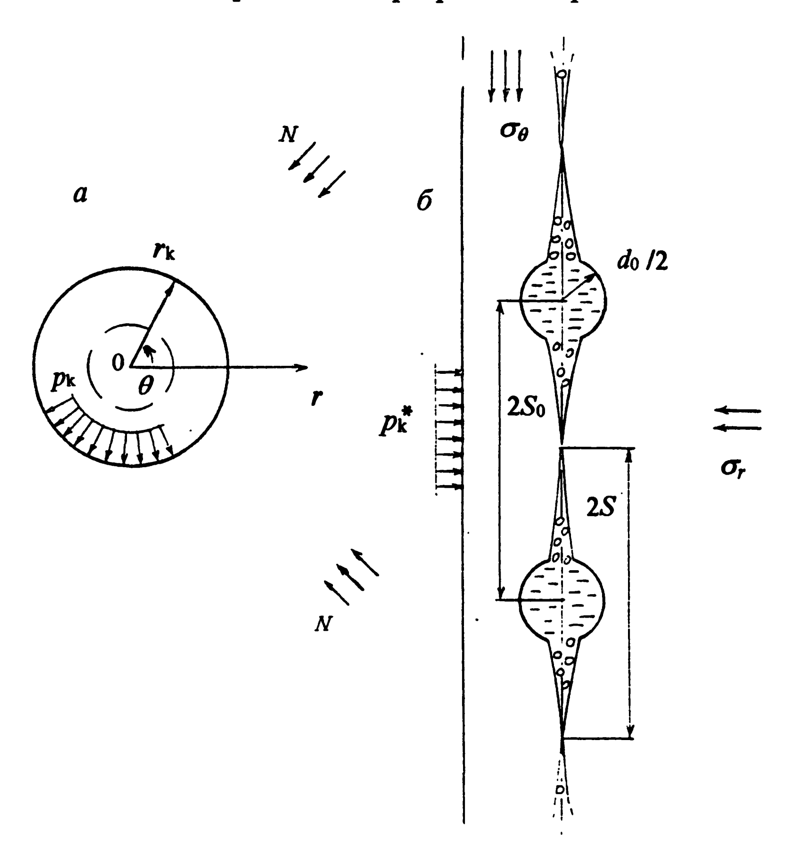


Рис. 6.1. Схемы к расчету разрушения породы на стенке камеры (скважины):

а – сечение камеры; б – прорастание трещинопор на стенке камеры

Рассматриваем среды двух видов: с шаровидными порами и с сильно вытянутыми в одном направлении порами, которые будем считать цилиндрическими. Внимание к последним обусловлено относительной простотой анализа в этом случае (плоская модель), а также тем обстоятельством, что в определенных условиях цилиндрические (длинные) поры в значительно большей степени, чем шаровидные способны поддерживать развитие микротрещин отрыва. Следовательно, случай цилиндрических пор позволяет получить одну из крайних оценок.

Считаем, что поры имеют равный радиус $d_0 / 2$ и равно удалены друг от друга. Они связаны малыми фильтрационными каналами и могут быть заполнены водой.

Рассматриваем два масштабных уровня: масштаб добычной камеры (а) и масштаб поры (б) (см.рис.6.1). Соответственно рассматриваем напряженное состояние на двух масштабных уровнях. Обозначим σ_r, σ_θ, σ_z – главные компоненты напряжений в задаче масштабного уровня камеры.

Считаем для простоты, что напряженное состояние нетронутого массива горных пород описывается соотношениями "гидростатики". Главные компоненты природных напряжений равны горному давлению $N = \gamma H$, создаваемому весом вышележащих горных пород. Поскольку в этой работе мы будем рассматривать механику гидрогазоимпульсного разрушения массива на средних глубинах, то считаем, что состояние массива возле камеры является допредельным, а порода деформируется по закону линейной упругости.

Рассмотрим характерные геомеханические ситуации для технологического цикла "закачивание рабочего агента – сброс давления".

1. Перед закачиванием рабочего агента в массив упругое распределение напряжений в массиве можно описать формулами

$$\sigma_r = N-(N-p_k) (r_k / r)^2 ,\quad \sigma_\theta = N+(N-p_k) (r_k / r)^2 ,\quad \sigma_z = N , \tag{6.1}$$

где p_k – реальное давление рабочега агента в камере.

2. С началом технологического цикла давление рабочего агента в камере повышается. Давление закачивания должно быть большим, но не превышать горное (во избежании гидроразрыва). Поэтому на этом этапе $p_k = N$, и в масштабе камеры восстанавливается исходное однородное напряженное состояние ($\sigma_\theta = \sigma_r = N$).

3. Если в скважине (камере) давление закачивания выдерживается в течение некоторого времени, то вследствие фильтрации рабочего агента в массив повышается давление порового заполнителя. Пусть на момент окончания закачивания распределение гидростатического давления рабочего агента описывается функцией $p_c(r)$. Это распределение давления находится в результате решения фильтрационной задачи.

4. При сбросе давления рабочего агента в скважине снова происходит перераспределение напряжений в массиве. Компоненты напряжений σ_r и σ_θ описываются формулами (6.1), в которые сле-

дует поставить $p_k = p_k^*$, где p_k^* – начальное давление водногазовой смеси в камере после сброса давления в скважине. При высоком давлении воды в порах, а также в результате уменьшению напряжения σ_r и увеличения σ_θ создаются условия для роста из пор микротрещин. Геомеханическое состояние массива после сброса давления является исходным для рассмотрения условий развития микротрещин из пор.

Развитие микротрещин отрыва рассматривается в задаче малого масштабного уровня (см. рис. 6.1,б). Напряжения в масштабе камеры σ_r, σ_θ в этой задаче рассматриваются как напряжения "на бесконечности". Считается, что поры изначально имеют зародышевые микротрещины отрыва, ориентированные в направлении, перпендикулярном направлению действия компоненты минимального сжатия σ_r.

Пору с двумя микротрещинами будем называть трещинопорой. Ее длину в направлении роста микротрещин, т.е. в направлении действия компоненты σ_θ, обозначим $2S$. Если длина трещинопоры станет равной расстоянию между порами, лежащими приблизительно в одной плоскости ($2S = 2S_0$), то отдельные трещинопоры должны соединиться, образовав магистральную трещину.

Как следует из (6.1) напряжения σ_r, противодействующие росту микротрещин, минимальны на стенке камеры. Поэтому наиболее благоприятные условия для роста микротрещин отрыва реализуются именно на стенке камеры, причем и в том случае, когда радиус камеры растет в результате послойного отрыва породы и стенка смещается в пространстве. Следовательно, условия начала микроразрушения и прекращения макроразрушения горной породы могут быть удовлетворительно исследованы, исходя из выполнимости соответствующих критериев разрушения на стенке камеры.

Математическое условие, определяющее после сброса давления длину предельно равновесной микротрещины отрыва на стенке камеры, в соответствии с теорией трещин можно записать

для шаровидных пор

$$K_{1c}/(\pi d_0/2)^{1/2} = \left(p - p_k^*\right)\lambda^{1/2} F_3(\lambda), \tag{6.2}$$

для цилиндрических (длинных) пор

$$K_{1c}/\left(\pi d_0/2\right)^{1/2} = 2\left(N - p_k^*\right)\lambda^{1/2} F_1(\lambda) - (p - p_k^*)\lambda^{1/2} F_2(\lambda). \tag{6.3}$$

Здесь p – давление заполнителя поры; p_k^* – давление в камере после сброса давления; $F_1(\lambda)$, $F_2(\lambda)$, $F_3(\lambda)$ – функции безразмерной длины $\lambda = (2S/d_0)-1$ микротрещин отрыва, начинающихся от границы круглой поры. Эти функции отражают влияние на рост микротрещин формы поры и определяются из решения соответствующих задач теории упругости. На рис. 6.2 графики функций F_1 , F_2, F_3 построены в соответствии с [110].

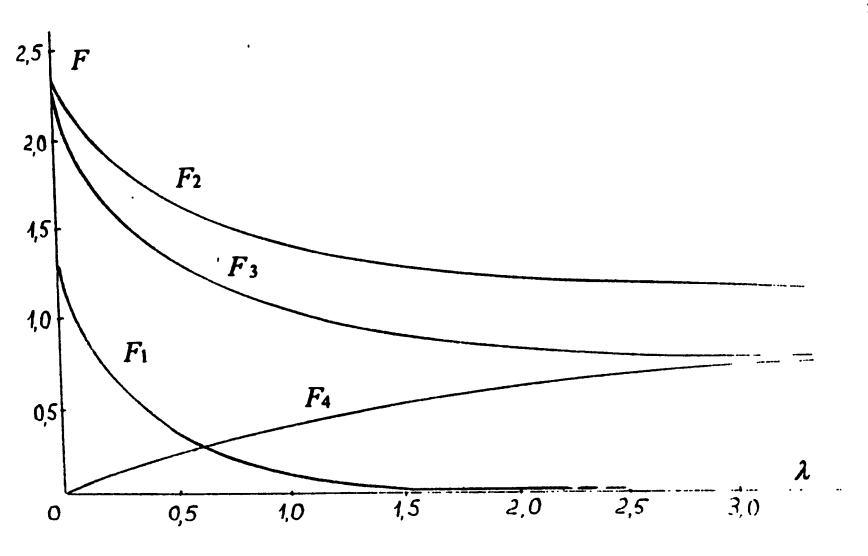


Рис. 6.2. Графики функций, входящих в соотношения (6.3), (6.15)

Условие начала микроразрушения может быть получено из (6.2) и (6.3), подставляя в эти формулы значение длины зародышевых микротрещин $2S_i$ (в безразмерном виде $(\lambda_i = 2S_i / d_0)-1$) и значение давления воды в соответствующей точке $p = p_C(r)$ на момент сброса давления в скважине. Таким образом, условие начала развития микроразрушений на цилиндрической поверхности камеры, определяемой координатой r , имеет вид

в среде с шаровидными порами

$$K_{1c} / \left[\left(\pi \ d_0 \lambda_i / 2 \right)^{1/2} F_3(\lambda_i) p_C \right] + p_k^* / p_C = 1 \quad , \qquad (6.4)$$

в среде с цилиндрическими порами

$$K_{1c} / \left[\left(\pi\ d_0 \lambda_i / 2\right)^{1/2} F_2(\lambda_i) p_C\right] - 2(N - p_k^*) F_1(\lambda_i) / \left[F_2(\lambda_i) p_C\right] + $$
$$+ p_k^* / p_C = 1 \quad .$$

(6.5)

Из соотношений (6.4),(6.5) можно определить минимальное значение давления водногазовой смеси в камере p_k^* , при котором начнется процесс микроразрушений в массиве пород.

Как выше отмечалось, с развитием микротрещин падает давление порового заполнителя. Закон изменения давления зависит от природы заполнителя. В случае, когда пора содержит воду с растворенным газом, изменение давления в трещинопоре можно найти, используя закон Генри

$$m = S_H (p_S - p), \qquad (6.6)$$

где m – масса газа, выделившегося из единицы объема воды при понижении ее давления от давления насыщения p_S до текущего значения p , S_H – постоянная Генри, и уравнение состояния газа

$$p\mathrm{V} = mRT/\mu . \qquad (6.7)$$

Здесь p – давление газа, V – занимаемый объем, R – универсальная газовая постоянная, T – температура, μ – молекулярный вес.

Используя (6.7) и (6.6) и принимая во внимание [52], можно найти для давления водногазовой смеси в выросшей трещинопоре p приближенное соотношение. Им можно пользоваться, если длина микротрещин превышает радиус поры в несколько раз

$$p / p_C = \left\{\left[4j + \left(1 - jp_k^* / p_C\right)^2\right]^{1/2} + jp_k^* / p_C - 1\right\} / (2j) . \qquad (6.8)$$

Параметр j зависит от вида поры:

для шаровидной поры

$$j = 4\left(1 - \nu^2\right)\alpha\ p_C\left(\lambda + 1\right)\left(\lambda^2 - \lambda_i^2\right) / \left(\pi\ S_H E\right), \qquad (6.9)$$

для цилиндрической поры

$$j = 2\left(1 - \nu^2\right)\alpha\ p_C\left(\lambda + 1\right)\left(\lambda - \lambda_i\right) / \left(S_H E\right). \qquad (6.10)$$

Для удобства записи введен параметр $\alpha = \mu / (RT)$; $p_C(r)$ – значение давления воды в поре с координатой r ; λ – безразмерная длина трещинопоры, λ_i – длина зародышевой трещинопоры. В

расчетах эту величину надо задавать. В приближенной оценке можно считать

$$\lambda_t = (2S_i / d_0) - 1 \le 0{,}1.$$

Системы уравнений (6.2), (6.8) и (6.3),(6.8) позволяют найти длины устойчивых равновесных микротрещин отрыва, прорастающих от шаровидных и цилиндрических пор соответственно. Анализ решения этих систем уравнений показывает, что при резком сбросе давления в скважине и в случае шаровидных пор, и в случае цилиндрических пор микротрещины отрыва растут скачкообразно.

Начало макроразрушения определяется условием слияния микротрещин, растущих от соседних крупных пор (см. рис.6.1,б). Значение показателя пористости, учитывающего только крупные поры, обозначим m_k. Если показатель m_k (в %), известен , то предельная длина микротрещин в безразмерном виде λ_M может быть легко оценена. Исходя из определения пористости, можно получить

для шаровидных пор

$$\lambda_M = \left[(4\pi/3)\, 100/\, m_k \right]^{1/2}/2 - 1 , \qquad (6.11)$$

для цилиндрических пор

$$\lambda_M = (\pi\, 100 \,/\, m_k)^{1/2}/2 - 1 . \qquad (6.12)$$

Системы соотношений (6.2), (6.8), (6.11) и (6.3), (6.8), (6.12) определяют условие макроразрушения сред с шаровидными и цилиндрическими порами при гидрогазоимпульсном воздействии.

Используя эти соотношения, можно определить значения радиуса камеры r_* , при котором динамический процесс послойного отрыва остановится. Заметим, что послойный отрыв обязательно должен остановиться, поскольку на развитие микротрещин влияет поровое давление рабочего агента перед сбросом давления, а распределение этого давления имеет вид убывающей функции. Условие остановки послойного отрыва на новой границе камеры может быть записано как условие предельного касания микротрещин, проросших от соседних пор.

Для того, чтобы определить координату новой границы камеры r_*, необходимо располагать зависимостью давления воды с растворенным газом на момент сброса давления $p_C(r)$ и знать давление в камере после сброса p_k^*. Для нахождения r_* следует выполнить следующие операции (например для породы с шаровидными порами). 1) Из уравнений (6.2), (6.8) получить соотношение, связывающее величину p_C с другими параметрами модели

$$K_{1c} / \left[\left(\pi d_0 \lambda / 2 \right)^{1/2} F_3(\lambda) p_C \right] + p_k^* / p_C =$$
$$= \left\{ \left[4j + \left(1 - j p_k^* / p_C \right)^2 \right]^{1/2} + j p_k^* / p_C - 1 \right\} / (2j) \quad . \tag{6.13}$$

2) определить по формуле (6.11) значение λ_M и подставить $\lambda = \lambda_M$ в (6.9) и (6.13); 3) Численно решая уравнение (6.13) (в совокупности с соотношением (6.9)), найти значение p_C ; 4) по известной из расчетов фильтрации зависимости $p_C(r)$ определить искомый радиус r_* , соответствующий значению p_C .

Подчеркнем, указанный алгоритм вычислений r_* позволяет оценить радиус камеры после окончания динамического процесса послойного отрыва. Однако после динамической стадии процесс разрушения может стать квазистатическим. В этом случае возможность разрушения будет зависеть от соотношения скорости падения давления в камере и скорости обратной фильтрации рабочего агента в камеру. Поэтому оценка r_* по указанному выше алгоритму может быть заниженной и ее следует рассматривать лишь как консервативную предварительную оценку.

Наряду с гидрогазоимпульсным воздействием на массив целесообразно при тех же условиях оценить эффективность гидроимпульсного воздействия, когда в качестве рабочего агента используется обычная вода. Также целесообразно оценить эффективность газоимпульсного воздействия, когда в массив нагнетается только сжатый газ.

Соотношения (6.2) и (6.3) справедливы для обоих указанных случаев. Законы изменения давления порового заполнителя, естественно, различаются. В случае нагнетания в массив сжатого газа соотношение (6.8) выполняется, однако для параметра j имеем другое выражение

$$j = 4\left(1 - \nu^2\right)\left(\lambda + 1\right)^3 p_C / \left(\pi E\right), \tag{6.14}$$

Это соотношение несложно получить, если воспользоваться уравнением (6.7) и при упрощенной оценке V считать, что длина микротрещин значительно превышает радиус пор.

При использовании в качестве рабочего агента обычной воды закон убывания давления воды в поре определяется ее сжимаемостью и зависит от соотношения модулей объемного сжатия воды K_B и минерального скелета породы $K_П$. Для небольших длин микротрещин отрыва можно использовать следующее соотношение (случай цилиндрических пор)

$$p / p_C = 1 - F_4(\lambda)(N - p_k^{\bullet}) / p_C . \qquad (6.15)$$

График функции $F_4(\lambda)$ при $K_П / K_B = 10$ показан на рис. 6.2. Он построен в результате расчетов изменения объема трещинопоры под действием продольных и поперечных напряжений, а также распирающего трещинопору давления воды. Расчеты проведены методом конечных элементов [59].

Полученные выше соотношения использованы в примере, иллюстрирующем влияние некоторых параметров модели на процесс гидрогазоимпульсного разрушения пористой породы.

6.3. Пример расчета гидрогазоимпульсного воздействия на массив пористой породы

Рассмотрим модельный пример расчета гидрогазоимпульсного воздействия на массив горных пород в технологическом цикле "нагнетание воды в массив – сброс давления воды в скважине". Расчеты фильтрации рабочего агента производились при следующих значениях параметров:

– природное горное давление $N = 2{,}1$ МПа (глубина разработки около 100 м);
– пористость горной породы $m_k = 10$ %;
– проницаемость породы для воды $k = 10$ мД;
– коэффициент вязкости воды $\mu_ж = 1$ мПа с;
– коэффициент вязкости газа (воздуха) $\mu_г = 0{,}018$ мПа с;
– модуль объемного сжатия воды $K_B = 10^3$ МПа;
– коэффициент, характеризующий изменение пористости от давления $k_m = 10^3$ МПа;
– постоянная Генри $S_H = 10^{-6}$ сек^2/ м^2
– давление нагнетания рабочего агента 2 МПа;
– начальный радиус камеры $r_k = 3$ м;

В этом примере считается, что природные поры изначально заполнены обычной водой при атмосферном давлении. (Заметим, что давление природной поровой воды относительно слабо влияет на разрушение породы).

На рисунке 6.3, заимствованном из [50], кривая *1* показывает распределение давления предварительно закачиваемой в массив обычной воды без газа. Предварительное закачивание обычной воды необходимо для того, чтобы поднять давление воды в порах и, таким образом, предотвратить преждевременный выход растворенного газа из воды на фронте фильтрации. Вследствие прежде-

временного выхода растворенного газа может образоваться воздушная "пробка" и фильтрация рабочего агента резко замедлится.

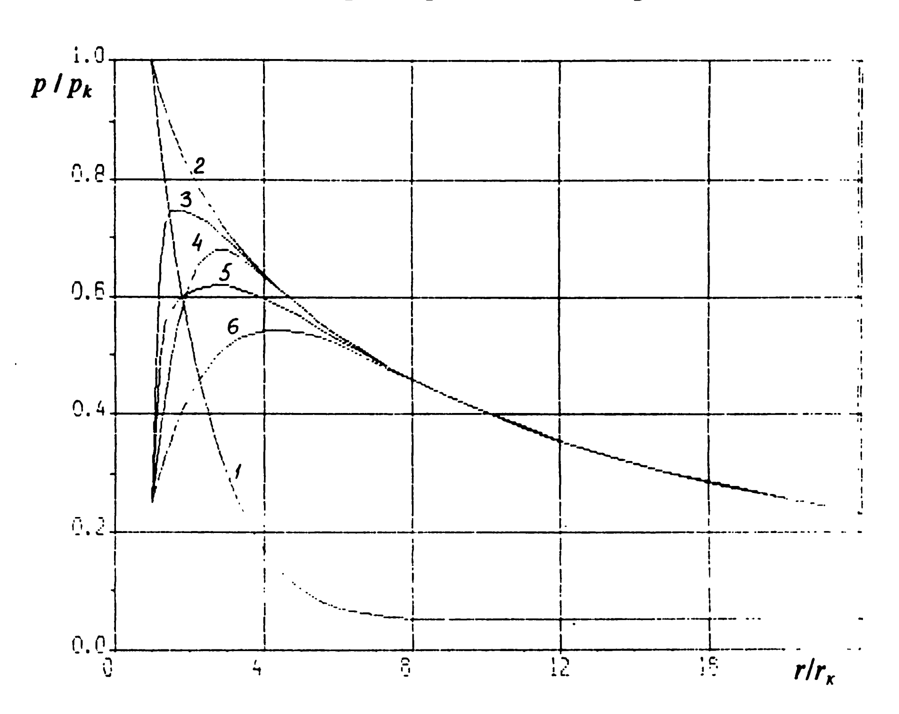


Рис. 6.3. Кривые распределения приведенного давления воды в порах p / p_k по радиусу r / r_k

В рассмотренном примере время закачивания обычной воды составляет 10 минут. Малое время закачивания обычной воды объясняется тем, что вода изначально находится в порах. Поэтому время, равное 10 минутам, требуется не для того, чтобы "загнать" воду в массив, а чтобы поднять ее давление.

Далее в примере производился расчет фильтрации воды с растворенным воздухом. В этом расчете начальным условием являлось распределение давления *1*, полученное в предыдущем расчете. Рассматриваемое в расчетах время закачивания определялось из условия продвижения фронта воды с растворенным воздухом примерно на половину радиуса камеры, т.е. на то расстояние, в пределах которого целесообразно произвести отслоение массива.

Расчеты показывают, чтобы мощность области отслоения массива $\Delta r = r_* - r_k$ была не меньше половины радиуса камеры r_k ,

необходимое время закачивания воды с растворенным воздухом должно составлять 25 час. Полученное при этом распределение давления рабочего агента в порах $p_C(r)$ представляет кривая *2* на рис. 6.3. Распределение $p_C(r)$ используется в расчете увеличения радиуса добычной камеры.

Заметим, что для пластов большой мощности относительно большое время закачивания рабочего агента оправдывается большим объемом обрушенной за цикл породы, ибо обрушение должно охватить всю мощность пласта.

Считаем, что далее производится технологический сброс давления в скважине. Давление в камере мгновенно падает до значения p^*_k = 0,5 МПа. При этом значении давления производился расчет обратной фильтрации водногазовой смеси в камеру и определялось текущее распределение давления воды с растворенным воздухом и свободным газом в массиве.

На рис. 6.3 кривые *3* и *4* описывают распределение давления в массиве после технологического сброса давления в скважине через 2 и 10 мин. соответственно. На этом же рисунке для сравнения приведены кривые распределения давления для случая использования воды без растворенного воздуха: *5* – после 2 мин.; *6* – после 10 мин.

Как видно из рисунка, в случае использования воды с растворенным воздухом давление в окрестности камеры падает в значительно меньшей степени, что важно для развития процесса отслоений. Следовательно, вода с растворенным воздухом является более эффективным рабочем агентом по фактору фильтрации.

Рассмотрим теперь результаты расчетов длин микротрещин отрыва, выросших на стенке новой камеры ($r_k = r_*$) после сброса давления в скважине. Эти результаты представлены в виде графиков на рис. 6.4, где показана для различных случаев зависимость длины микротрещины (в безразмерном виде $\lambda = (2S / d_0) - 1$) от безразмерного параметра $p_C\left(\pi d_0 / 2\right)^{1/2} / K_{1c}$ (отношения давления воды в поре с координатой $r = r_*$ перед сбросом давления к трещиностойкости).

Кривые *1–9* характеризуют развитие микротрещин в среде с шаровидными порами. При этом кривые *1–3*,*9* относятся к случаю, когда давление в камере после сброса равно 0,5 МПа. Кривые *4–8* соответствуют случаю, когда это давление равно 0,8 МПа. Принятые величины p^*_k вполне реальны в первую минуту после технологического сброса давления в скважине.

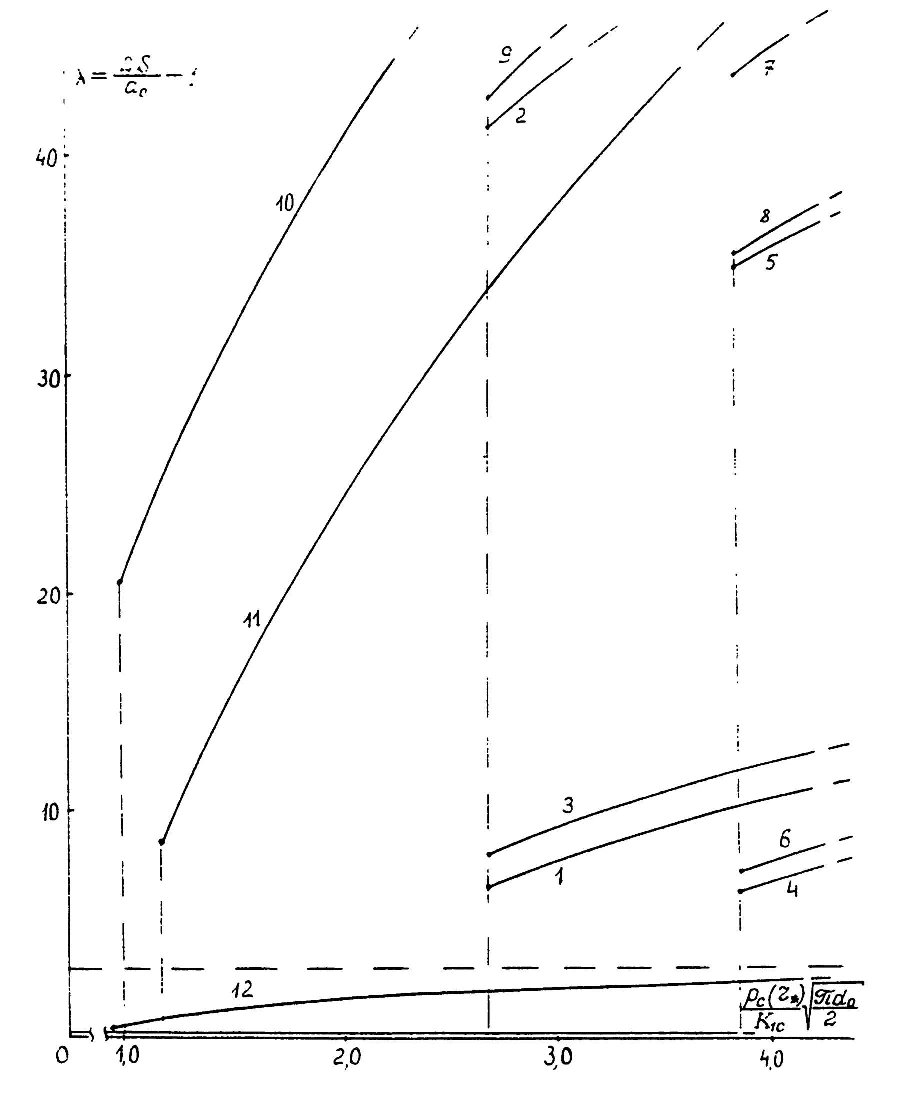


Рис. 6.4. Зависимости приведенной длины микротрещин от приведенного давления порового заполнителя (пояснение в тексте)

Кривая *1* описывает длину микротрещин в точке с координатой r_* (т.е. на новой стенке камеры), когда в качестве рабочего

агента используется вода с растворенным воздухом. Растворимость в воде воздуха, определяемая растворимостью азота, невелика в сравнении с растворимостью CO_2 . Поэтому, если в качестве растворяемого газа используется углекислота, то длина выросших микротрещин в несколько раз больше, чем в случае растворения воздуха. Об этом свидетельствует кривая *2*, построенная при тех условиях, что и кривая *1*.

Растворимость газов зависит от температуры. С понижением температуры воды от 20°C до 0°C растворимость газов возрастает примерно в полтора–два раза. Для оценки влияния этого фактора, наряду с кривой *1*, соответствующей температуре воды 20°C, построена кривая *3* для воды с растворенным воздухом при температуре 0°C .

Кривые *4*,*6* характеризуют длину микротрещин при меньшем сбросе давления в камере (до величины $p_k^* = 0{,}8$ МПа , в качестве растворенного газа рассматривался воздух). Кривая *4* построена для температуры воды 20°C, кривая *6* для температуры 0°C. Кривые *5*,*7* относятся к случаю, когда при тех же температурах используется CO_2.

Кривые *8*,*9* приводятся для сравнения гидроимпульсного воздействия на массив с другим воздействием – газоимпульсным, при котором в качестве рабочего агента используется сжатый воздух. Кривая *9* относится к случаю, когда давление в камере после сброса составляет 0,5 МПа, кривая *8* – для случая, когда давление равно 0,8 МПа. Эти кривые свидетельствует о высокой эффективности сжатого воздуха в разрушении породы. Однако применение сжатого воздуха в качестве рабочего агента связано с технологическими трудностями, которые здесь не обсуждаются.

Кривые *10*, *11* построены для среды с длинными (цилиндрическими) порами, рабочий агент – вода с растворенным воздухом при температуре 0°C. Кривая *10* соответствует давлению в камере после сброса 0,5 МПа, кривая *11* – давлению 0,8 МПа.

Анализируя эти кривые можно, заключить: во-первых, разрушение в среде с длинными порами может начинаться при существенно меньшей величине давления воды в порах на момент сброса; во-вторых, при тех же условиях микротрещины в среде с длинными порами могут быть значительно больше. Поскольку для горной породы более типичны поры в виде эллипсоидов, чем шаров, то можно сделать вывод, что аналитическая оценка радиуса области отслоения, проводимая по модели шаровидных пор, может быть заниженной.

Наконец, кривая *12* относится к случаю, когда в качестве рабочего агента используется обычная (негазонасыщенная) вода. Кривая построена для случая цилиндрических пор, причем давление в камере после сброса составляет всего 0,2 МПа. Из расположения этой кривой можно сделать вывод, что при использовании обычной воды микротрещины прорастают на малую длину даже при очень благоприятных условиях.

Выше отмечалось, что в разрушении породы основную роль играют крупные поры. Значение показателя пористости, учитывающего только крупные поры, может быть весьма низким ($m_k <$ 1%). На рис. 6.4 штриховая горизонтальная линия отмечает значение λ_M, соответствующее пористости m_k = 1%. Кривая *12* лежит ниже этой горизонтальной линии (т.е. кривая находится в области высокой пористости). Отсюда можно заключить: гидроимпульсный метод разрушения пористой породы, в основе которого лежит воздействие на массив обычной воды, может быть эффективным либо при очень высокой природной пористости породы, либо в том случае, когда порода вблизи добычной камеры находится в запредельном состоянии и обладает высокой наведенной пористостью.

6.4. Выводы и рекомендации

Исследования, проведенные в этой главе, позволяют не только глубже понять качественную сторону процесса разрушения пористой среды при участии воды и растворенного газа, но и получить соотношения для количественной оценки разрушения массива пористой породы. Эти соотношения могут служить основой для разработки практической методики выбора технологических параметров гидрогазоимпульсного метода разрушения в скважинах выветрелых угольных пластов, низкопрочных руд и других пористых полезных ископаемых.

На эффективность гидрогазоимпульсного метода разрушения породы в подземной добычной камере оказывают влияние тип рабочего агента, давление насыщения газа в воде, величина сброса давления в добычной камере, скорость сброса давления, диаметр добычной камеры, время закачивания рабочего агента в массив. К наиболее важным выводам и рекомендациям можно отнести следующие.

1. В качестве рабочего агента наилучшим образом подходит вода с растворенной углекислотой. Эффективность воды с растворенным воздухом в несколько раз ниже. Однако и этот тип рабочего агента вполне может быть использован на практике, если добиваться того, чтобы давление насыщения газа в воде было приблизительно равно давлению закачивания рабочего агента.

2. Применение в качестве рабочего агента обычной (негазонасыщенной) воды целесообразно лишь в том случае, когда природная или наведенная пористость полезного ископаемого (в отношении крупных пор) не ниже 15%. Очень высокую эффективность и по фактору фильтрации, и по разрушению имеет сжатый газ.

3. Следует стремиться к максимально возможному давлению насыщения растворяемого газа в воде и к максимально возможной величине давления закачивания рабочего агента в массив. Однако во избежании гидроразрыва давление закачивания не должно превышать горное.

4. Время предварительного закачивания воды и время закачивания рабочего агента в массив в сумме может составлять около суток. Однако большое время предварительного закачивания воды и рабочего агента определяет относительно большой объем отслоений в массиве за один сброс давления. В благоприятных условиях производительность отбойки (отслоение при сбросе давления) в камере радиусом 3 м может составить около кубометра в час с одного погонного метра скважины в месте добычи. Поэтому при большой мощности пласта этот метод разрушения породы может быть эффективным.

5. За счет увеличения давления закачивания эффективность гидрогазоимпульсной отбойки должна расти с глубиной разработки. Оценка показывает, что этот метод скважинной гидродобычи пористых полезных ископаемых наиболее эффективен для тех глубин, на которых природное горное давление достигает примерно половины прочности породы на одноосное сжатие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В книге разработана теория развития макротрещин отрыва в сжатых горных породах, с помощью которой можно понять некоторые особенности разрушения и деформирования массива горных пород вблизи выработок, создаваемых на большой глубине.

Один из главных выводов работы состоит в том, что отрыв при сжатии является особым видом разрушения, присущим материалам с дефектами и явно выраженной микроструктурой. Микроструктура, многочисленные микродефекты породы являются не только причиной зарождения микроразрушений, но и движущей силой процесса другого масштабного уровня – макроразрушения. Это обстоятельство отличает отрыв при сжатии от отрыва при растяжении.

Разрушение пород отрывом необходимо рассматривать не как некоторую предельную, граничную ситуацию, а как развивающийся процесс. Используемый в книге подход с позиции теории трещин позволяет выносить суждение о статике или динамике возможного развития трещин, что во многих случаях помогает составить более полное представление о характере проявлений горного давления, связанных с отрывным разрушением.

Например, из исследований следует, что вблизи обнажений пород с плотной зернистой структурой развитие трещин и соответствующие проявления горного давления должны носить динамический характер, а в породах с крупнопористой структурой разрушение должно быть квазистатическим. Однако, разрушение пористой породы тоже может быть динамическим (или его можно сделать динамическим искусственно), если в порах будет находиться газ, вода или газонасыщенная вода.

Другая особенность работы связана с развитием представлений о структуре наведенной трещиноватости. Из натурных наблюдений и разработанной теории следует, что в массиве возможно образование областей интенсивной трещиноватости отрывного типа, в которых трещины ориентированы в одном направлении и расположены близко одна к другой.

Такие области должны находиться на некотором удалении от обнажения и содержать закрытые трещины, поэтому о них можно говорить как о скрытых областях разрушения. Скрытые области отрывного трещинообразования имеют особенно большое значение в газоносных породах, где они могут быть очагами зарождения выбросов пород (угля) и газа.

В плотных зернистых породах вблизи обнажений растущие трещины должны выходить на поверхность обнажения, образуя заколы. На некотором удалении от поверхности наведенные трещины должны быть ориентированы вдоль обнажения. Микротрещинная модель отрыва, описанная в книге, позволяет дать не только правдивое качественное описание реального процесса трещинообразования, но и получить оценку мощности зоны приповерхностной дезинтеграции пород. Результаты расчетов согласуются с практикой, что является доказательством достоверности теоретических разработок и их работоспособности в отношении прогноза отрывного разрушения в горных выработках.

Полученные в книге соотношения могут служить основой для разработки практических методик прогноза отрывного разрушения пород в различных горно-геологических условиях. В частности, это относится к оценке изменения формы сечения выработок, проходимых в массивах прочных пород, и гидрогазоимпульсному разрушению пористых водонасыщенных полезных ископаемых.

В рассмотренных примерах не преследовалась цель детальности исследования. Приведенные примеры, главным образом, показывают, что учет фактора отрыва пород при сжатии позволяет по-новому взглянуть на механизм тех явлений, о которых уже сложилось некоторое суждение. Иногда это может повлиять не только на результат количественной оценки параметров области разрушения, но и изменить общее представление о процессе разрушения. В этой связи уместно упомянуть вывод о возможном образовании в пористом массиве не одной трещины гидроразрыва, а некоторой области гидрорасслоения.

Как следует из теории (а также шахтных наблюдений) интенсивность отрывного разрушения массива в горных выработках и скважинах должна увеличиваться с ростом глубины. Это обстоятельство может иметь отрицательные и положительные стороны.

Ухудшение горно-технических условий разработки с глубиной связано с общим понижением устойчивости выработок и скважин в сильнонапряженных массивах горных пород. Повысить устойчивость выработок можно следующим образом.

Во-первых, изначально придавать выработкам устойчивую форму, например, создавая выработки с сечением, имеющим двугранный угол. Задача прогноза разрушения, вполне решаемая уже в настоящее время, заключается в определении расположения этого угла и его величины в зависимости от горно-геологических условий проведения выработки. Во-вторых, следует использовать двухэтапную проходку выработок. Сначала проходится предварительная выработка, в которой у обнажения пород образуется припо-

верхностная зона дезинтеграции. Затем осуществляется повторная проходка, при которой снимается слой дезинтегрированных пород. После этого наведенные трещины на стенках выработки должны быть ориентированы вдоль обнажения, что значительно повысит устойчивость выработки в целом.

Повышение интенсивности отрывного разрушения с глубиной может быть и благоприятным фактором. В массивах хрупких пород с ростом глубины создаются условия для образования по крайней мере двух зон дезинтеграции пород. Вблизи выработки образуется автономная область, отделенная от массива ложным контуром. Эта автономная область является своего рода защитным барьером от активных (в том числе динамических) геомеханических процессов, происходящих в глубине массива.

Кроме того, на больших глубинах должны снижаться энергетические затраты на принудительное разрушение горных пород. Главная роль в разрушении массива должна перейти к горному давлению. Геомеханическое исследование в этой связи может заключаться в определении оптимального способа отделения от массива слоя полуразрушенных и слабо связанных с массивом пород. Идеи гидрогазоимпульсного метода разрушения массива могут оказаться здесь весьма полезными.

Автор выражает надежду, что разработки, содержащиеся в этой книге, окажут определенное влияние на развитие теоретических и прикладных исследований устойчивости выработок и управления разрушением пород на больших глубинах.

Список литературы

1. *Айруни А.Т.* Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах. – М.: Наука, 1987, 342 с.
2. *Айтматов И.Т.* Геомеханика рудных месторождений Средней Азии. – Фрунзе : Илим, 1987, 246 с.
3. *Алексеев А.Д., Недодаев Н.В., Стариков Г.П.* Разрушение газонасыщенного угля, находящегося в объемном напряженном состоянии, при разгрузке. Моделирование выбросов угля и газа // Препринт Ин. пробл. механики АН СССР. Москва – 1980.– N.139 – 30 с.
4. *Аренс В.Ж., Исмагилов Б.В., Шпак Д.Н.* Скважинная гидродобыча твердых полезных ископаемых. – М.: Недра, 1980, 229 с.
5. *Арнольд В.И.* Теория катастроф. – М.: Наука, 1990, 128 с.
6. *Бабичев Н.И.* Технология скважинной гидродобычи полезных ископаемых. – М.: Недра, 1981.
7. *Баклашов И.В.* Деформирование и разрушение породных массивов. – М.:Недра, 1988, 271 с.
8. *Баренблатт Г.И., Христианович С.А.* Об обрушении кровли в горных выработках // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. – 1955. – N11 – С. 73–86.
9. *Барон Л.И.* Горнотехническое породоведение.– М.: Наука, 1977, 324 с.
10. *Барон Л.И., Керекилица Л.Г.* Сопротивляемость горных пород отрыву. – Киев: Наукова думка, 1974.
11. *Барях А.А., Щоц М.М.* Численный анализ разрушения соляного массива с трещинами // VII Всесоюзн. научн. школа "Деформирование и разрушение материалов" (тезисы докладов). – Симферополь: СГУ, 1990, с.11–12.
12. *Батугин С.А., Шаманская А.Т.* Стреляние горных пород на Таштагольском железорудном месторождении // Горное давление, сдвижение горных пород и методика маркшейдерских работ. – Л.: ВНИМИ, вып. 68, с. 461–471.
13. *Бенявски З.* Управление горным давлением. – М.: Мир, 1990, 254 с.
14. *Берон А.Е., Чирков С.Е.* Исследование прочности горных пород в условиях трехосного неравномерного сжатия // Научные сообщения ИГД им. А.А.Скочинского. – 1969. – с. 33–38.
15. *Бич Я.А., Муратов Н.А.* Профилактика горных ударов. – Владивосток: Издат. Дальневост. ун-та, 1990, с. 248.
16. *Бобин В.А.* Сорбционные процессы в природном угле и его структура. – М.: ИПКОН АН СССР, 1987, 135 с.
17. *Бобин В.А., Зимаков Б.М., Одинцев В.Н.* Оценка энергии межмолекулярного отталкивания молекул сорбата в микропорах угля // ФТПРПИ. – 1989. – N 5. – С. 48–56.
18. *Бобряков А.П., Крамаренко В.И., Ревуженко А.Ф. и др.* О стрелянии горных пород // ФТПРПИ. – 1980. – N 5. – С. 3–12.

19. *Борщ-Компониец В.И., Макаров А.Б.* Горное давление при отработке мощных пологих рудных залежей. – М.: Недра, 1986, 271 с.
20. *Бронников Д.М., Замесов Н.Ф., Богданов Г.И.* Разработка руд на больших глубинах. – М.: Недра, 1982, 292 с.
21. *Бронников Д.М., Трубецкой К.Н., Шемякин Е.И. и др.* Будущее горной науки. – М.: Наука, 1989, 168 с.
22. Введение в механику горных пород (ред. Х.Бок). – М.: Мир, 1984, 280 с.
23. *Ветров С.В.* Допустимые размеры обнажений горных пород при подземной разработке руд. – М.: Наука, 1975, 275 с.
24. *Влох Н.П., Липин Я.И., Зубков А.В.* Стреляние скальных пород и мероприятия его предупреждения // Горные удары, методы оценки и контроля удароопасности массивов горных пород (ред.И.М.Петухов и др.) – Фрунзе: Илим, 1979, с.151 – 161.
25. *Галыбин А.Н.* Развитие трещин от границы узкой полости в двухосносжатом теле // Прикл. математ. и механика. – 1995. – Том 59. – Вып. 3. – С. 493–500.
26. *Галыбин А.Н., Одинцев В.Н.* Образование протяженных сдвиговых трещин при разработке глубоких жильных месторождений // ФТПРПИ. – 1991. – N 5. – С. 87–93.
27. *Германович Л.Н., Дыскин А.В.* Модель разрушения хрупкого материала с трещинами при одноосном нагружении // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1988. – N 2. – С. 118–131.
28. *Германович Л.Н., Дыскин А.В., Салганик Р.Л., Цырульников М.Н.* Механизм деформирования и разрушения хрупких пород при одноосном сжатии // Деформировани и разрушение горных пород (ред. И.Т.Айтматов и др.). – Бишкек: Илим, 1990, с. 298–307.
29. *Гольдштейн Р.В., Ентов В.М.* Качественные методы в механике сплошных сред. – М.: Наука, 1989, 224 с.
30. *Гольдштейн Р.В., Ладыгин В.М., Осипенко Н.М.* Модель хрупкого разрушения слабо пористого материала при сжатии и растяжении // ФТПРПИ. – 1974. – N 1. – С. 3–13.
31. *Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М.* Механизм образования упорядоченных систем нарушений при сложном напряженном состоянии // Механика разрушения горных пород (ред. И.Т.Айтматов и др.). Фрунзе: Илим, 1979, с. 47–51.
32. *Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М.* Разработка механических моделей деформирования структур разрушения горных пород с целью количественного описания тектонических процессов // Отчет по программе "Сейсмичность". – М.: Инст. пробл. механики АН СССР, 1991, 49 с.
33. *Гудьер Дж.* Математическая теория равновесных трещин // Разрушение.Том 2. (Отв. ред. Г.Либовиц). – М.: Мир, 1975, с.13–82.
34. *Глушко В.Т., Виноградов В.В.* Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления. – М.: Недра, 1982, 193 с.
35. *Гузь А.Н.* Основы теории устойчивости горных выработок. Киев: Наукова думка, 1977, 204 с.

36. *Гузь А.Н.* Механика разрушения композитных материалов при сжатии. – Киев: Наукова думка, 1990, 632 с.
37. *Друккер Д.* Макроскопические основы хрупкого разрушения // Разрушение. Том 1. (Отв. ред. Г.Либовиц). – М.: Мир, 1973, с. 505–569.
38. *Дыскин А.В., Салганик Р.Л.* Модель дилатансии хрупких материалов с трещинами при сжатии // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1987. – N 6. – С.169–178.
39. *Дядькин Ю.Д.* Разработка геотермальных месторождений . – М.: Недра, 1989, 229 с.
40. *Егоров П.В., Редькин В.А., Попов В.Н.* Динамические проявления горного давления при разработке Джезказганского месторождения // Горное давление и горные удары. – Л.: ВНИМИ, 1976, вып. 99, с. 133–195.
41. *Егоров П.В., Шаманская А.Т., Коваленко В.Н., Гайдин П.Т. и др.* Исследование стреляния горных пород на рудниках Горной Шории // Тр. ВНИМИ. – 1970. – N 74.
42. *Журков С.Н., Куксенко В.С., Слуцкер А.И.* Образование микроскопических трещин в полимерах под нагрузкой // Физика твердого тела. – 1969. – N 11. – С.296.
43. *Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. и др.* О прогнозировании разрушения горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. – N 6.
44. *Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. и др.* Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел // Физические процессы в очагах землетрясений при разрушении твердых тел. Физические основы прогнозирования горных пород. – М. : Наука, 1980, с. 78–86.
45. *Зорин А.Н.* Управление динамическими проявлениями горного давления. – М. : Недра, 1978, 175 с.
46. *Зорин А.Н., Колесников В.Г., Диденко А.Т.* Гидроимпульсный способ добычи угля // Уголь. – 1991.– N1.
47. *Иванов Б.М., Фейт Г.Н., Яновская М.Ф.* Механические и физико-химические свойства углей выбросоопасных пластов. – М.:Наука, 1975,195 с.
48. *Иванов В.И.* Моделирования процесса стреляния пород // Разработка рудных месторождений Кольского полуострова. – Апатипы: Кольский Филиал АН СССР, 1973, с. 34-37.
49. *Иофис М.А., Шмелев А.И.* Инженерная геомеханика при подземных разработках. – М.: Недра, 1985, 248 с.
50. *Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Одинцев В.Н.* Механика гидро-газоимпульсного воздействия на трещиновато-пористую породу при скважинной гидродобыче // ФТПРПИ. – 1995. – N 5. – С. 70–83.
51. *Карташов Ю.М., Михеев Г.В.* О прочности твердых горных пород на сжатие и растяжение // Механика разрушения горных пород (ред. И.Т.Айтматов и др.) – Фрунзе: Илим, 1980, с. 206–214.
52. *Коваленко Ю.Ф.* О механизме разрушения кернов из коллекторов нефтяных месторождений // ФТПРПИ. – 1990. – N3. – С. 57–62.

53. *Коваленко Ю.Ф.* Элементарный акт явления внезапного выброса. Выброс в скважину // Препринт Института проблем механики АН СССР. Москва. – 1980. – N 145. – С. 44.
54. *Коваленко Ю.Ф.* Эффективные характеристики тел с изолированными газонаполненными трещинами. Волна разрушения // Препринт Инст. пробл. механики АН СССР. Москва. – 1980. – N 155. – С.52.
55. *Коврижных А.М.* О потере устойчивости горных пород вокруг выработок и скважин // ФТПРПИ. – 1990. – N 5. – С. 105–110.
56. *Кондауров В.И., Мухамедиев Ш.А., Никитин Л.В., Рыжак Е.И.* Механика разрушения горных пород. – М: Инст. физики Земли АН СССР им. О.Ю.Шмидта, 1987, 218 с.
57. *Костров В.Б., Фридман В.Н.* Механика хрупкого разрушения при сжимающих нагрузках // Физика очага землетрясения. – М.: Наука, 1975, с. 30–45.
58. *Кузнецов С.В.* Некоторые закономерности и соотношения, определяющие посадку лавы // ФТПРПИ. – 1965. – N 6 – С. 3–19.
59. *Кузнецов С.В., Одинцев В.Н., Слоним М.Э., Трофимов В.А.* Определить параметры разуплотненного состояния горных пород приствольной зоны на больших глубинах с учетом проникающего действия бурового раствора (Отчет о НИР I-II-89(с)). – М.: ИПКОН АН СССР, 1990, 73 с.
60. *Кундурос Х.* Исследование эффективных способов поддержания горизонтальных капитальных выработок на больших глубинах: Дисс... канд. техн. наук. – Моск. горн. ин-тут. – 1979. – С. 120.
61. *Кунтыш М.Ф.* Исследование методов определения основных физико-механических характеристик горных пород, используемых при решении задач горного давления: Дис. ... канд.техн. наук. – М.:ИГД им. А.А.Скочинского, 1964, 166 с.
62. *Курленя М.В., Миренков В.Е.* Методы расчета подземных сооружений. – Новосибирск: Наука, 1986, 231 с.
63. *Линьков А.М., Петухов И.М.* К теории разрушения угля послойным отрывом // Труды ВНИМИ. – 1973. – N 88. – С. 205–221.
64. *Линьков А.М., Петухов И.М., Сидоров В.С.* О росте трещин в подготовительной стадии и на фронте выброса // Труды ВНИМИ – 1977. – Т.106. – С. 46–55.
65. *Лавров Н.А., Слепян Л.И.* К теории разрушения твердых тел при сжатии // Записки Лен. горн. инст. – 1991. – Том 125. – С. 48–54.
66. *Липчанский Б.М., Мезенцев К.Т., Трофимов И.М., Шильцев В.А.* Естественное поле напряжений и динамические формы разрушения горного массива на руднике "Октябрьский" // Напряженное состояние породных массивов. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1978, с. 27–31.
67. *Мансуров В.А.* Прогнозирование разрушения горных пород. – Фрунзе: Илим, 1990, 240 с.
68. *Марков Г.А.* Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. – Л.: Наука, 1977, 213 с.

69. *Медведев Л.Г.* Проявления анизотропии при трехосном неравномерном сжатии // Вопросы механики горных пород при разработке месторождений твердых полезных ископаемых (ред. Д.М.Бронников). М.: ИПКОН АН СССР, 1982, с. 166–172.
70. *Мезенцев К.Т., Трофимов И.М.* Опыт ведения горных работ в условиях динамических проявлений горного давления // Горн. журн. – 1975. – N 8. – С. 34–36.
71. *Мельников Н.В.* Выступление на IV Всесоюзной конференции по механике горных пород // Современные проблемы механики горных пород. – Л.: Наука, 1972, с. 5–8.
72. *Мельников Н.Н., Конухин В.П., Комлев В.Н.* Подземное захоронение радиоактивных отходов. – Апатиты: Горный институт КНЦ РАН. – 1994, 214 с.
73. Методология расчета горного давления // С.В.Кузнецов, В.Н.Одинцев, М.Э.Слоним, В.А.Трофимов. – М.: Наука, 1981, 104 с.
74. Механизм инициирования динамических явлений в подготовительных забоях // Ж.С.Ержанов, Ю.А.Векслер, Н.А.Жданкин, С.Б.Колоколов. – Алма-Ата: Наука, 1984, 224 с.
75. Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти // В.Мори, Д.Фурменто и др. – М.: Мир, 1994, 416 с.
76. *Мусхелишвили Н.И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966, 707 с.
77. *Николаевский В.Н.* Механика пористых и трещиноватых сред. – М.: Недра, 1984, 232 с.
78. Нетрадиционные технологические процессы добычи угля // В.Н.Потураев, С.А.Полуянский, А.Н.Зорин и др. – Киев: Техника, 1986, 118 с.
79. *Никитин Л.В., Одинцев В.Н.* Механика отрывного разрушения сжатых газоносных горных пород // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1988. – N 6. – С. 135–144.
80. *Никитин Л.В., Одинцев В.Н.* Образование протяженных сомкнутых трещин отрыва в хрупких горных породах // Докл. АН СССР. 1987. – Т.294. – N 4. – С. 814–817.
81. *Никитин Л.В., Одинцев В.Н.* Распространение трещин отрыва в сжатых горных породах // Пластичность и разрушение твердых тел. – М.: Наука, 1988, с. 154–165.
82. *Николин В.И.* Гипотеза механизма выброса породы // Выбросы породы и газа. – Киев: Наукова думка, 1971, с. 16–21.
83. *Николин В.И., Меликсетов С.С., Беркович И.М.* Выбросы породы и газа. – М.: Недра, 1967, 79 с.
84. *Оберт Л.* Хрупкое разрушение горных пород // Разрушение. Т.7. Ч.1. – М.: Мир, 1976, с. 59–128.
85. *Одинцев В.Н.* Два типа обрушений на обнажениях трещиновато-блочного массива горных пород // Исследование параметров и показателей эффективности разработки жильных месторождений (ред. М.И.Агошков). – М.: ИПКОН АН СССР, 1983, с. 102–112.

86. *Одинцев В.Н.* Запредельное деформирование и зональная дезинтеграция горных пород вблизи выработок на больших глубинах // Горное давление и технология подземной разработки руд на больших глубинах (Ред. Н.Ф.Замесов). – М.: ИПКОН АН СССР, 1990, с. 20–25.
87. *Одинцев В.Н.* Масштабный эффект в развитии трещин отрыва при сжатии горной породы // Геология и геофизика. – 1994. – N 12. – С. 80 – 92.
88. *Одинцев В.Н.* Метод аналитического прогноза динамических проявлений горного давления // ФТПРПИ. – 1995. – N 4. – С.12–24.
89. *Одинцев В.Н.* О механизме зональной дезинтеграции массива горных пород вблизи глубоких выработок // ФТПРПИ. – 1994. – N 4. –С.10–17.
90. *Одинцев В.Н.* О некоторых особенностях напряженного состояния массива хрупких горных пород вблизи одиночной выработки //ФТПРПИ– 1985. – N 2. – С. 13–21.
91. *Одинцев В.Н.* Развитие трещины гидроразрыва в слабопроницаемом массиве горных пород // Вопросы разрушения горных пород (ред. Д.М.Бронников). – М.: ИПКОН РАН, 1994, с. 46–54.
92. *Одинцев В.Н., Трофимов В.А.* Компьютерное моделирование развития трещин отрыва вблизи обнажения в глубокой выработке // Тезисы докладов X Международной конференции по механике горных пород. – М.: ИГД им. А.А.Скочинского, 1993, с. 30–31.
93. *Одинцев В.Н., Трофимов В.А.* О моделировании на ЭВМ стреляния и контроля удароопасности шелушения пород в горных выработках // Горные удары, методы оценки и массивов горных пород (ред. И.М.Петухов и др.). – Фрунзе: Илим, 1979, с. 105–111.
94. *Одинцев В.Н., Трофимов В.А., Трумбачева С.В., Шильцев В.А.* Устойчивость горных выработок по фактору стреляния, заколообразования и шелушения // Вопросы механики горных пород (ред. Н.М.Осипенко)– М.: ИПКОН АН СССР, 1979, с. 3–34.
95. *Опарин В.Н.* Основы теории геомеханической интерпретации данных геофизического каротажа: Дисс... д-ра физ.-мат. наук. – М.: ИФЗ АН СССР, 1987.
96. *Опарин В.Н., Тапсиев А.П.* О некоторых закономерностях трещинообразования вокруг горных выработок // Горные удары, методы оценки и контроля удароопасности массивов горных пород (ред. И.М.Петухов и др.). – Фрунзе: Илим, 1979, с. 342–349.
97. *Осипенко Н.М.* Исследование механизма хрупкого разрушения трещиноватых горных пород // Дисс... канд. техн.наук. СФТГП. ИФЗ АН СССР. – 1972.
98. *Панасюк В.В.* Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. – Киев: Наукова думка, 1968, 246 с.
99. *Петухов И.М., Линьков А.М.* Механика горных ударов и выбросов.– М .: Недра, 1983, 280 с.
100. *Писаренко Г.С., Науменко В.П., Митченко О.В., Волков Г.С.* Экспериментальное определение величины K1 при сжатии пластины вдоль линии трещины // Проблемы прочности.– 1984. – N 11. – С. 3–9.

101. *Поль Б.* Макроскопические критерии пластического течения и хрупкого разрушения // Разрушение. Т.2. – М.: Наука, 1975, с. 336–520.
102. *Проскуряков Н.М., Фомина В.Д., Рожков В.К.* Газодинамические явления на Солигорских калийных рудниках. – Минск: Полымя, 1974, 212 с.
103. *Реутов В.А.* Гидравлический разрыв пласта // Итоги науки и техники. ВИНИТИ. Сер. Механика деформируемого твердого тела. 1989. –Т. 20. – С. 84–188.
104. *Родионов В.Н., Сизов И.А.* Проявление неоднородности напряженного состояния при разрушении горных пород // ФТПРПИ. –N3.–1981.– С. 45–55.
105. *Родионов В.Н., Шемякин Е.И.* Горное производство: фундаментальные проблемы сохранения среды обитания // Вестник АН СССР. – 1990. – N 2. – С. 26–33.
106. *Сизов И.А.* Особенности временного хода деформаций вокруг подземной выработки // Проблемы механики горных пород (Ред. Д.М.Бронников, И.И.Зурабишвили). – М.: Наука, 1987, с. 125–132.
107. *Слепян Л.И.* Механика трещин. - Л.: Судостроение, 1990.
108. *Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений.– М.: Наука, 1993, 313 с.
109. *Соболев Г.А., Кольцов А.В.* Крупномасштабное моделирование подготовки и предвестников землетрясений. – М.:Наука, 1988, 203 с.
110. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. (Ред. Ю.Мураками). – М.: Мир, 1990, 1019 с.
111. *Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г.* Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. – М.: Недра, 1985, 271с.
112. *Султонов У., Куксенко В.С.* К вопросу о прогнозировании разрушения горных пород // Межвуз. сборник N 3. Физика, структура и свойства твердых тел. – Куйбышев. – 1979.
113. Теория защитных пластов // И.М.Петухов, А.М.Линьков, В.С.Сидоров. – М.: Недра, 1976, 223 с.
114. Технология подземной разработки калийных руд // В.Г.Зильбершмидт, К.Г.Синопальников, Г.Д.Полянина и др. – М.: Недра, 1977, 287 с.
115. *Тропп Э.А., Розенбаум М.А., Рева В.Н., Глушихин Ф.Л.* Зональная дезинтеграция пород вокруг горных выработок на больших глубинах. – Л.: Физ.-техн. ин-т АН СССР им.А.Ф.Иоффе, 1985, N 976.
116. *Трофимов В.А.* Методика численного расчета напряженного состояния хрупкой среды вблизи трещины // Вопросы разрушения горных пород (Ред. Д.М.Бронников). – М.: ИПКОН РАН, 1994, с. 55–66.
117. *Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р., Чаплыгин Н.Н.* Современные горные науки: предмет, содержание и новые задачи // Горный журнал.– 1994. – N 6. – С. 3–7.
118. Устойчивость горных пород при бурении скважин на большие глубины // Сеид-Рза М.К., Фаталиев М.Д. и др. – М.: Недра, 1972, 272 с.
119. *Фамин Я.А.* Внезапный выброс угля и газа в лабораторных условиях // Проблемы рудничной вентиляции. – ИГД АН СССР, 1959, с.219-224.

120. *Ходот В.В., Яновская М.Ф., Премыслер Ю.С. и др.* Физико-химия газодинамических явлений в шахтах. – М.: Наука, 1973, 140 с.
121. *Христианович С.А.* О волне дробления // Изв. АН СССР. ОТН. Механика и математика. – 1953 – N 12. – 1689–1699.
122. *Христианович С.А., Салганик Р.Л.* Внезапные выбросы угля (по-роды) и газа. Напряжения и деформации // Препринт Инст. пробл. механики АН СССР. Москва. – 1980. – N 153.
123. *Христианович С.А., Салганик Р.Л.* Выбросоопасные ситуации. Дробление. Волна выброса // Препринт Института проблем механики АН СССР. – 1980. – N 152. – С.44.
124. *Черепанов Г.П.* Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974, 640 с.
125. *Черепанов Г.П.* Распространение трещин в сжатых телах // Прикладн. математ. и механика. – 1966. – Т.30. – Вып.1. – С.82–93.
126. *Черняк И.Л., Кузмич О.Ю., Зайденварг В.Е.* Геомеханические процессы в слоистом массиве вокруг одиночных выработок // Уголь. – 1991. – N 11. – С.37–39.
127. *Шейдеггер А.* Физические аспекты природных катастроф. – М.: Недра, 1981, 232 с.
128. *Шемякин Е.И.* Новые задачи механики горного массива // Будущее горной науки (ред. М.И. Агошков). – М.: Наука, 1989, с.34–45.
129. *Шемякин Е.И.* Геомеханические и экологические аспекты освоения подземного пространства // Подземное пространство мира. 1993 – N4. – С. 21– 26.
130. *Шемякин Е.И., Фисенко Г.Л., Курленя М.В., Опарин В.Н. и др.* Эффект зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок // Докл. АН СССР. – Т. – 289. – N 5. – С. 1088–1094.
131. *Эттингер И.Л.* Внезапные выбросы угля и газа и структура угля. – М.: Недра, 1969, 160 с.
132. *Эттингер И.Л.* Растворимость и диффузия метана в угольных пластах // ФТПРПИ. – 1987. – N 2. – С.79–90.
133. *Adams G.R., Jager A.J., Roering C.* Investigation of rock fracture around deep-level gold mine stopes // Proceed. 22nd U.S. Symposium on Rock Mech. – Cambridge: M.I.T. , 1981.
134. *Adams G.R., Jager A.I.* Petroscopic observation of rock fracturing ahead of stope faces in deep-level gold mines // J. South African Inst. Mining and Metallurgy. – 1980. – Vol. 80 – N 6. – P. 204–209.
135. *Airuni A., Zverev I., Ettinger I. and other.* Investigating the role played by solid gas-coal solutions in outburst hazard formation // Proceedings of the 23 Int. Conf. of Safety in Mines. – Washington, 1989, p.505–514.
136. *Ashby M.F., Hallam S.D.* The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress state // Acta Metall. – 1986. – V.34. – P. 497–510.

137. *Atkinson B.K., Meredith P.G.* The theory of subcritical crack growth with applications to minerals and rocks // Fracture Mechanics of Rocks (Ed. B.K.Atkinson). – London: Academic Press, 1987.
138. *Botham J.C.* Association of gases with coal - laboratory outburst tests on solid coal specimens // Canada, Dept. Mines & Tech. Surveys, Fuel Div., Tech. Mem. 75/77 – CG, 1957.
139. *Brace W.F.* Brittle fracture of rocks // State of stress in the Earth's crust. Proc. Intern. Conf. Santa Monica, California. – N.Y.: Elsevier, 1964, p. 110–178.
140. *Brace W.F., Paulding B.W., Scholz C.* Dilatancy in the fracture of crystalline rocks // J. Geophys. Res. – 1966. – V.77 – P. 3939–3953.
141. *Byerlee J.* A review of rock mechanics studies in the US pertinent to earthquake prediction // Pure and Appl. Geophys. 1978. – Vol. 116. – P.586–602.
142. *Coates D.F.* Rock mechanics principles. – Ottawa: Department of Mines and Techn. Surveys, 1965.
143. *Costin L.S.* A microcrack model for the deformation and failure of brittle rock // J. Geophys. Res. – 1983. – V.88. – P. 9485– 9492.
144. *Cundall P.A. et al.* Formulation of a three-dimensional distinct element model (Part I and Part II) // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 1988. – Vol. 25. – N 3.
145. *Dey T.N., Wang Chi-Yuen.* Some mechanisms of microcrack growth and interaction in compressive rock failure // Int. J.Rock Mech.Min.Sci. – 1981. – V.18. – N 3. – P. 199–209.
146. *Fairhurst C.* Foreword to computers, rock mechanics and rock engineering // Int.J.Rock Mech.Min.Sci. – 1988. – V.25. – N 3. – P.3 – 12.
147. *Fairhurst C., Cook N.G.W.* The phenomenon of rock splitting parallel to the direction of maximum compression in the neigbourhood of a surface // Proc. First Congr. Intern. Soc. Rock Mech.– 1966. – V.1.– P. 687–692.
148. *Farmer I. W.* Engineering Behaviour of Rocks. – London/New York: Chapman and Hall, 1983.
149. *Galybin A.N., Odintsev V.N.* The propagation of shear cracks near tabular stope // Assesment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering (Ed. by A.G.Pasamehmetoglu et al.). – Rotterdam: A.A.Balkema, 1993, p. 193–198.
150. *Goodman R.E., Taylor R.L., Brekke T.L.* A model for the mechanics of jointed rock // J.Soil Mech. and Foun. Div. Proc.Amer. Soc. Civ. Eng. – 1968. – Vol.94. – SM3. – P. 637-659.
151. *Gramberg J.* The axial cleavage fracture I. Axial cleavage fracturing is a significiant process in mining and geology // Eng. Geol. – 1965. – Vol. 1.- P. 31–72.
152. *Gramberg J.* The ellipse with notch theory to explain axial cleavage fracturing of rocks (a natural extension to the first Griffith theory) // Int. J. Rock Mech. Min.Sci. – 1970. – Vol.7. – P. 537–559.

153. *Haimson B.C.*(Issue coordinator) Hydrolic fracturing stress measurements // Int.J.Rock Mech. Min. Sci. – 1989. – Vol. 26. – N 6.
154. *Hallbauer D.K., Wagner H., Cook N.G.W.* Some observations concerning the microscopic and mechanical behavior of quartzite specimens in stiff, triaxial compression tests // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 1973. –V.10. – P. 713.
155. *Hargraves A.J.* Instantaneous outbursts of coal and gas. A review // Proc. Australas. Inst. Min. Mettal. – 1983. – N 285. – P. 1– 37.
156. *Hilsdorf H.* Die Bestimmung der zweiachsigen Festigkeit von Beton // Deutscher Ausschuss Stahlbeton. – 1965. – B.173.
157. *Hoek E., Bieniawski Z.* Brittle fracture propagation in rock under compression // Intern. J.Fract. Mechanics. – 1965. – Vol.1 – N 3.
158. *Horii H, Nemat-Nasser S.* Compression induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure // J. Geophys. Res. – 1985. – V.90. – P. 3105–3125.
159. *Horii H., Nemat-Nasser S.* Brittle failure in compression: splitting, faulting and brittle-ductile transition // Phil.Trans. R. Soc. Lond. A . – 1986. – V.319. – P. 337–374.
160. *Hudson J.A., Crouch S.L., Fairhurst Ch.* Soft, stiff and servo-controlled testing machines: a review with reference to rock failure // Engineering Geology. – 1972. – Vol. 6. – P. 155–189.
161. *Kemeny J.M.* A model for non-linear rock deformation under compression due to sub-critical crack growth // Int.J. Rock Mech. Min.Sci. – 1991. – V.28. – N 6. – P. 459–467.
162. *Kemeny J.M., Cook N.G.W.* Determination of rock fracture parameters from crack models for failure in compression // Rock Mechanics. Proceed. 28th U.S. Symp. on Rock Mech. – Rotterdam: A.A. Balkema, 1987, p.367–374.
163. *Kemeny J.M., Cook N.G.W.* Formation and stability of steeply dipping joint sets // Proc. 26th U.S. Symp. on Rock Mech. –Balkema: Rotterdam, 1985, P. 471–478.
164. *Kemeny J.M., Cook N.G.W.* Crack model for the failure of rock under compression // Proc. 2nd Int. Conf. Constitutive Laws for Engineering Materials. – 1987. – Vol.2. – P. 879–887.
165. *Kranz R.L.* Microcracks in rocks: a review // Tectonophysics. – 1983.- V.100. – P.449–480.
166. *Kranz R.L.* Crack-crack and crack-pore interaction in stressed granite // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 1979. – Vol. 16. – P. 37–47.
167. *Napier J.A.L.* Modelling of fracturing near deep level gold mine excavation using a displacement discontinuity approach // Mechanics of jointed and faulted rock. H.P.Rossmanith (ed.).–Rotterdam: A.A.Balkema, 1990, p. 709–715.
168. *Nemat-Nasser S., Horii H.* Compression-induced nonplanarcrack extention with application to splitting, exfoliation and rockburst // J. Geophys. Res. – 1982. – Vol. 87. – P. 6805.

169. *Nemat-Nasser S., Obata M.* A microcrack model of dilatancy in brittle materials // J.Appl. Mech. – 1988. – V.55. – P. 24–35.
170. *Nemat-Nasser S., Sumi Y., Keer L.M.* Unstable growth of tension cracks in brittle solids: stable and unstable bifurcation, snap through, and imperfection sensitivity // Int. J. Sol. Struct. – 1980. – Vol. 16. – P.1017.
171. *Obert L., Duvall W.I.* Rock mechanics and the design of structures in rock. – New York / London: John Wiley & Sons, 1967, 650 p.
172. *Odintsev V.N.* Scale effect in rock axial splitting // Scale effects in rock masses 93. A. Pinto Da Cunha (ed.). – Rotterdam: A.A.Balkema, 1993, p. 225–231.
173. *Rummel F., Hansen J.* Interpretation of hydrofracture pressure recodings using a simple fracture mechanics simulation model // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 1989. – V.26. – P.483–488.
174. *Sammis C.G., Ashby M.F.* The failure of brittle porous solids under compressive stress state // Acta Metall. – 1986. –V.34. –N3. – P.511–526.
175. *Santarelli F.J., Brown E.T.* Failure of three sedimentary rocks in triaxial and hollow cylinder compression tests // Int.J. Rock Mech. Min. Sci. – 1989. – V.26. – N 5. – P. 401–413.
176. *Stacey T.R.* A simple extention strain criterion for fracture of brittle rock // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 1981. –V.18. – P. 469–474.
177. *Stacey T.R.,Jongh C.L.* Stress fracturing around a deep-level bored tunnel // J.S.Afr. Inst.Mining and Met. – 1977. –V.78. – N5. –P. 124–133.
178. *Starfield A.M., Cundall P.A.* Towards a methodology for rock mechanics modelling // Int. J. Rock Mech. Min.Sci. – 1988. –V.25. – N 3. – P. 99.
179. *Steif P.S.* Crack extention under compressive loading // Engineering Fracture Mech. – 1984. – Vol. 20. – P.463.
180. *Turchaninov I.A., Markov G.A., Lovchikov A.V.* Conditions of changing of extra-hard rock to weak rock under the influence of technical stresses of massif // Weak Rock. Soft, Fractured and Weathered Rock (Ed. K. Akai et al.). – Rotterdam: A.A.Balkema, 1981, vol. 1, p. 555–561.
181. *Trollope D.H.* The mechanics of discontinua or elastic mechanics in rock problems // Rock mechanics in engineering practice (Ed. K.G. Stagg and O.C.Zienkiewicz). – New York: Wiley, 1968, p.275–320.
182. *Vardoulakis J., Sulem J., Guenot A.* Borehole instability as bifurcation phenomena // Int. J. Rock Mech. Min. Sci.– 1988. – Vol. 25. – P. 159-170.
183. *Walsh J.B.* The effect of cracks on compressibility of rocks // J. Geoph. Res. – 1965. – Vol. 70. – P. 381.
184. *Wawersik W.R., Fairhurst C.A.* Study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 1970. – Vol 7. – P. 564–575.

СОДЕРЖАНИЕ

Научное издание

Одинцев Владимир Николаевич

ОТРЫВНОЕ РАЗРУШЕНИЕ МАССИВА СКАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Лицензия ЛР N21037 от 08 февраля 1996 г.
Подписано в печать с оригинал-макета 14.06.96г.
Формат 60x84 1/16. Бумага “Amicus Professional”. Печать офсетная.
Набор компьютерный.Гарнитура “Антик”. Печ.л.10.38.
Тираж 300 экз. Заказ 9. Цена договорная.

Институт проблем комплексного освоения недр РАН.
111020, Москва, Крюковский тупик, 4.

Издание ИПКОН РАН, 111020, Москва, Крюковский тупик, 4.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

1. Страница 51, строка 35 св.

напечатано — если микротрещина

должно быть — если макротрещина

2. Страница 66

напечатано

$$\Phi(z)=\frac{-(z^2-l_t^2)^{1/2}(\gamma_1\sigma_1^0-\gamma_3\sigma_3^0)}{2(z^2-l^2)}+\left[(2\gamma_1+1)\sigma_1^0-(2\gamma_3+1)\sigma_3^0\right]/4$$

должно быть

$$\Phi(z)=\frac{-(z^2-l_t^2)^{1/2}(\gamma_1\sigma_1^0-\gamma_3\sigma_3^0))}{2(z^2-l^2)}+\left[(2\gamma_1+1)\sigma_1^0-(2\gamma_3-1)\sigma_3^0\right]/4$$

3. Страница 125, формулы (5.8)

напечатано

$$\varsigma=(N/\sigma_S)(L_B/m_0)^{1/2}$$

$$\rho=8(1-\nu^2)(R/m_0)$$

должно быть

$$\varsigma=(N/\sigma_S)(L_B/m_0)^{1/2}\left[\frac{(1-\nu^2)M}{E}\right]^{1/2}$$

$$\rho=8(1-\nu^2)(R/m_0)\left(\frac{M}{3\pi E}\right)$$